



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA**

Tesis doctoral

**El comportamiento energético de una fachada ventilada de
juntas abiertas.**

Autor:
Emanuela Giancola Arquitecto

Año 2010

DPTO. CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tesis doctoral

**El comportamiento energético de una fachada
ventilada de juntas abiertas.**

Autor:
Emanuela Giancola
Arquitecto

Directores:
D^a. M^a Rosario Heras Celemín
Doctora en Física

D. F. Javier Neila González
Doctor en Arquitectura

Año 2010

Tribunal nombrado por el Magfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día..... de de 2010

PRESIDENTE _____
VOCAL _____
VOCAL _____
VOCAL _____
SECRETARIO _____
SUPLENTE _____
SUPLENTE _____

Realizado en el acto de defensa y lectura de la tesis el día..... de de 2010 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

PRESIDENTE

VOCALES

i.-INDICE

- i.- Índice
- ii.- Resumen
- iii.- Abstract
- iv.- Agradecimientos
- v.- Nomenclatura

1.- INTRODUCCIÓN

- 1.1.- Prólogo. Contexto social y científico, la construcción y el impacto sobre el ambiente
- 1.2.- La fachada ventilada
- 1.3.- Objeto de la tesis
- 1.4.- Planificación de la tesis
- 1.5.- Estado del Arte

2.- FUNDAMENTOS TEORICOS

- 2.1.- Introducción
- 2.2.- Confort en verano
- 2.3.- Refrigeración Natural
- 2.4.- Ventilación Natural
- 2.5.- Procesos físicos de intercambio energético en edificios y parámetros que lo caracterizan

2.6.- Principales parámetros que caracterizan térmicamente la envolvente de un edificio.

3.- EVOLUCIÓN DE LA TÉCNICA

3.1.- Introducción

3.2.- La innovación histórico-tecnológica: desde los sistemas constructivos tradicionales hasta las “fachadas ventiladas”

3.3.- Innovación tecnológica

3.4.- Física de la fachada ventilada de juntas abiertas

3.5.- Conclusiones

3.6.- Alcance de la investigación

4.- EXPERIMENTACIÓN REAL EN UNA FACHADA VENTILADA DE JUNTAS ABIERTAS

4.1.- Objetivos de la monitorización

4.2.- Metodología

- Conocimiento previo.
- Análisis de sensibilidad.
- Diseño y ejecución del experimento
- Análisis de los datos experimentales
- Modelos para el estudio experimental:(Modelos estáticos; modelos dinámicos)

4.3.- Planteamiento de la Monitorización

- Descripción del Edificio y de la fachada monitorizada
- Metodología experimental
- Diseño experimental
- Puntos de medida

4.4.- Sensores

4.5.- Frecuencia de lectura y registro

4.6.- Sistema de adquisición de datos

4.7.- Análisis de los Resultados

5.- MODELIZACIÓN FLUIDODINAMICA DE UNA FACHADA VENTILADA DE JUNTAS ABIERTAS MONITORIZADA

5.1.- Introducción

5.2.- Métodos numéricos en fachadas

5.3.- Desarrollo de la modelización numérica

- Fundamentos de Computational Fluid Dynamics. Ecuaciones de Navier-Stokes
- Software y hardware
- Discretización
- Configuración de las condiciones de contorno
- Modelos de turbulencia
- Tiempo de CPU
- Beneficio del uso de CFD en fachada ventilada

5.4.- Conclusiones

6.- VALIDACIÓN DEL MODELO FLUIDODINAMICO CON DATOS EXPERIMENTALES Y TERMOGRAFIAS

6.1.- Introducción

6.2.- Variables de validación y resultados

- Estudio Termografico
- Temperaturas de las plaquetas
- Temperaturas del aire interior del fluido
- Temperaturas de la pared interior

6.3.- Análisis de los resultados

6.4.- Discusión

6.5.- Conclusión

7.- CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS

8.- BIBLIOGRAFIA

9.- ANEXOS

Anexos I.- Técnicas numéricas

AI.1.- Relación bibliográfica

AI.2.- Métodos numéricos en Mecánica de Fluidos

AI.3.- Niveles de aproximación empleados en las técnicas numéricas

AI.4.- Ecuaciones de gobierno y condiciones de contorno

AI.5.- Discretización espacial: generación de mallado

AI.6.- Modelos matemáticos

AI.7.- Método de discretización de las ecuaciones

AI.7.1.- Convergencia, consistencia, estabilidad

AI.7.2.- Métodos de discretización espacial empleados

AI.8.- Solución simultáneas de las ecuaciones

Anexos II.- Geometría, detalle constructivo real y características técnicas de la fachada ventilada de juntas abiertas y las utilizadas en las aproximaciones numéricas

All.1.- Geometría, dimensiones, detalle constructivo reales y características técnicas de la fachada ventilada de juntas abiertas.

ii. Resumen.

En este trabajo se muestra un estudio del comportamiento térmico y dinámico de una fachada ventilada de juntas abiertas. Más concretamente, se han realizado medidas experimentales y simulaciones numéricas orientadas a la investigación del funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas expuesta a la radiación solar en periodo de verano y de invierno.

En el estudio experimental, primeramente, se han obtenido las características globales de funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abierta situada en un edificio en la ciudad de Almería. Después, mediante la utilización de sensores de temperatura se han obtenido las distribuciones de las temperaturas en la cara interior del revestimiento exterior (plaquetas cerámicas), en el canal de aire y en la pared interior del cerramiento. Se ha estudiado la validez de los distintos resultados mediante un correspondiente análisis.

Las simulaciones numéricas se han llevado a cabo utilizando un programa basado en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes por medio de un algoritmo de volúmenes finitos. La turbulencia se ha simulado por medio de un modelo k-e estándar y como modelo de radiación se ha utilizado un modelo de ordenadas discretas (DO) con el cual se han podido reproducir los efectos de la radiación solar incidente sobre la fachada mediante varios ángulos de incidencia; a esa se ha restado el correspondiente porcentaje debido a la reflectividad del material de las placas (entre 40-60%). Además, se ha tenido en cuenta el efecto de la radiación reflejada desde el suelo, incluida la radiación incidente en el nivel del suelo.

Se han realizado simulaciones bidimensionales estacionarias y además se ha generado un modelo tridimensional.

La comparación de los resultados indica una gran aproximación de las simulaciones numéricas a la definición de los distintos fenómenos globales del funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas. En concreto, el modelo tridimensional muestra resultados muy próximos a los experimentos.

El modelo bidimensional también aproxima satisfactoriamente dichas curvas a pesar de sus inherentes limitaciones.

Se han obtenido las distribuciones de temperaturas en revestimiento exterior, cámara de aire y pared interior tanto numérica como experimentalmente. Los modelos numéricos reflejan correctamente los fenómenos y tendencias observados, aunque no se adaptan a los valores cuantitativos medidos experimentalmente.

A partir de los trabajos numérico y experimental realizados se ha llegado a una comprensión más clara sobre cómo es el funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas, así como implementar técnicas de simulaciones para la caracterización de este tipo de cerramiento.

También se ha llegado a conclusiones interesantes sobre el efecto que tiene la separación del suelo y la influencia de la radiación sobre el tipo de material del revestimiento.

Finalmente, se plantean posibles ampliaciones del trabajo abordables según se vaya aumentando la potencia de cálculo, así como el desarrollo de nuevas metodologías de medida. Se prevé que en un futuro próximo las modelizaciones numéricas hayan llegado a un grado de madurez tal que se conviertan en una herramienta imprescindible tanto para el diseño como para el análisis del comportamiento bioclimático de una fachada ventilada de juntas abiertas.

iii. Abstract.

The thermo and dynamic behaviour of an open joint ventilated façade is studied. Experimental measurements and numerical simulations were carried out to investigating the performance of an open joint ventilated façade exposed to sunlight in summer and winter season.

The experimental study was firstly focused on the global performance of an open joint façade in a building located in the city of Almeria. Afterwards, using temperature sensors, the distributions of temperatures in the exterior slabs, slabs facing cavity, in the air channel and the inner wall of the enclosure were obtained.

The numerical simulations were developed with a finite volume code which solves the Navier-Stokes equations. The turbulence was simulated by a k-e standard model and to further reduce computation times, the Boussinesq approximation was used to model buoyancy (free convection) effects.. Solar radiation was introduced as a thermal load inside the slabs. Furthermore, to consider the reflectivity of the slabs material (between 40-60%), the corresponding percentage of reflected radiation has been detracted. Additionally, the effect of the radiation reflected from the ground has been taken into account including incident radiation at the ground level. The discrete ordinates (DO) radiation model has been chosen to this effect. A steady 2D simulations were made. A 3D model was also developed.

The comparison of the results using both techniques shows very good agreement in the phenomena of an open joint ventilated façade. The 3D model gives a better approximation to the efficiency than the 2D one.

The temperature distributions measured were also compared with the numerical results. The numerical results show good agreement with the experimentally measured trends. However they give higher values than the measured ones.

From the numerical and experimental studies, a deeper knowledge on the behaviour of an open joint ventilated façade has been obtained. Also some very interesting conclusions about the influence of the distance from ground and the influence of radiation on the coating material.

Finally, some possible future works are proposed. Those will be affordable with more computational resources and by developing new experimental methods. An advance in the development of computer simulations is foreseen in the near future. This tool will soon become irreplaceable in both analysis and design stages.

iv. Agradecimientos.

Lo primero, gracias a mi gente especialmente a Víctor, que son con los que he vivido y compartido todo este proceso, quiero agradecerles toda su paciencia, comprensión, interés y sus continuos ánimos durante la realización de este trabajo de investigación.

Con estas breves líneas nunca podré agradecer suficientemente a los que me ayudaron, colaboraron, ignoraron, animaron, criticaron, enseñaron, pasaron, revisaron....toda la investigación que me ha llevado a escribir esta tesis. Entre ellos mi jefa y directora, Maria del Rosario Heras Celemín, por la libertad y la confianza que me ha dado, por su comprensión y paciencia en el corregir mi castellano “italianizado”, pero, la verdad, esta tesis y esta memoria han sido muy duras. Del mismo modo quiero agradecer al director Francisco Javier Neila González especialmente su siempre amable apoyo desde el comienzo de mi labor investigadora.

El apoyo, consejos y recomendaciones recibidos por parte de mis compañeros de la Unidad de Eficiencia Energética en Edificios del CIEMAT y muchos otros (Silvia, Jaime, Toño, Rafa, Julio, Ricardo, Esther, Nuria, Alex, Roberto, Irene, Luís....) son algo que recordaré siempre. Destacaron, sobre todo, las ayudas recibidas durante la realización de la parte de simulación por parte de Cristina, Eduardo y M. José, han sido de gran ayuda y se han involucrado intensamente en la investigación. Sus ayudas han servido para que pudiera completar satisfactoriamente el trabajo que aquí se presenta.

Asimismo quiero agradecer al CIEMAT, que me ha permitido disponer de los recursos necesarios y en particular de la infraestructura experimental,

así como contar con el apoyo de servicios auxiliares de este Centro que han facilitado la realización de este trabajo.

Por último, quiero agradecer su colaboración a todos aquellos que, de una manera u otra, han contribuido a la realización de esta tesis. En general reitero las gracias por “lo que me han aguantado en estos últimos años”, por todas las ‘tensiones de tesis’ pasadas juntos.

NOMENCLATURA

Abreviaturas de parámetros físicos

Área (m^2)	A
Angulo entre dirección de viento y la normal ($^{\circ}$)	a
Área efectiva de grieta (ucm^2)	A_L
Cociente de flujo de aire ($m^3/(sPa)^n$).	c
Coefficiente de descarga para una abertura o grieta (-)	C_D
Calor específico a presión constante (J/kgC)	c_p
Coefficiente de presión de superficie debida al viento (-)	C_p
Coefficiente de infiltración relativo a la estratificación ($(L/s)^2(cm^4K)$)	C_s
Calor específico a volumen constante (J/kgC)	c_v
Coefficiente de infiltración relativo al viento ($(L/s)^2/[cm^4(m/s)^2]$).	C_v
Factor de forma entre las superficies i y j (-).	F_{ij}
Coefficiente de perdidas de calor por longitud de perímetro (W/mK)	F_2
Transmitancia solar o coeficiente de ganancia solar (m^2)	g
Constante gravitacional (kgm/Ns^2)	g_c
Transmitancia solar total o apertura solar (m^2)	g_A
Numero de Grashof	Gr
Conductancia térmica (W/K)	H
Coefficiente de transferencia de calor (W/m^2K)	h
Calor latente de evaporación (J/kg)	h_{fg}
Longitud (m)	L
Exponente de flujo de aire (-)	n
Numero de Nusselt	Nu
Numero de Prandtl	Pr
Resistencia térmica (K/W)	R
Numero de Reynolds	Re
Transmitancia térmica o coeficiente de transmisión de calor (W/m^2C)	U
Coefficiente de transmisión de calor (W/K)	UA
volumen (m^3)	V
Ancho de grieta (mm)	W
Conductividad térmica (W/mK)	?
Constante de Stefan-Boltzman ($Wm^{-2}K^{-4}$)	s
Emitancia (-)	e
Reflectancia (-), densidad de masa (Kg/m^3)	?
Absortancia (-), difusividad térmica (m^2/s)	a
Transmitancia (-)	t

Abreviaturas de variables físicas

Irradiancia (W/m^2)	G
Radio de humedad del aire (kg/kg)	H
Radiosidad (W/m^2)	J
Radio de flujo de aire (kg/s)	m
Presión (Pa)	P
Flujo de calor (W)	q
Flujo volumétrico de masa aire (m^3/s)	Q
Intercambios de aire (1/s) o intercambios de aire por hora (1/h)	l
Temperatura ($^{\circ}C$)	T
Temperatura (K)	T'
Tiempo (s)	t
Velocidad de viento (m/s)	v
Dirección de viento ($^{\circ}$)	vd
Coordenadas rectangulares (m)	x,y,z
Flujo de calor por unidad de área (W/m^2)	f

Abreviatura de subíndices

Conducción	cond
Convección	conv
Aire exterior	e
Aire interior	i
Latente	l
Neto	net
Estática	o
Radiación	rad
Sensible	S
Superficie, estratificación	s
Terreno	t
Viento	v
Flujo exterior	8

1. Introducción.

1.1. Prologo. Contesto social y científico, la construcción y el impacto sobre el ambiente.

El consumo energético de la edificación tiene un peso importante en el computo total del gasto de energía y sigue aumentando día a día, esto es debido, entre otras causas, a la carencia de cultura medioambiental de la sociedad en general y de los actores intervinientes en el proceso edificatorio en particular, de manera que las condiciones de confort en el interior de los edificios, se alcanzan a través de instalaciones con sistemas convencionales, con el consecuente consumo energético, producido a partir de fuentes no renovables.

Es imprescindible reducir la dependencia de nuestra economía del petróleo y los combustibles fósiles. Es una tarea urgente, según muchos de los estudiosos del medioambiente, porque la amenaza del cambio climático global y otros problemas ambientales son muy serios y porque, a medio plazo, no podemos seguir basando nuestra forma de vida en una fuente de energía no renovable que se va agotando. Además esto lo debemos hacer compatible, por un deber elemental de justicia, con lograr el acceso a una vida más digna para todos los habitantes del mundo.

Para lograr estos objetivos son muy importantes dos cosas:

- Por una parte, **aprender a obtener energía**, de forma económica y respetuosa con el medioambiente, de las fuentes renovables.

- Pero más importante aún, **aprender a usarla eficientemente.**

Usar eficientemente la energía significa no emplearla en actividades innecesarias y conseguir hacer las tareas con el mínimo consumo de energía posible. Desarrollar **tecnologías** y sistemas de vida que ahorren energía es lo más importante para lograr un auténtico desarrollo, que se pueda llamar sostenible. Por ejemplo, se puede ahorrar energía aislando adecuadamente las viviendas, oficinas y en general los que necesitan calefacción o aire acondicionado para mantenerse confortables. Construir un edificio con un buen aislamiento cuesta más dinero, pero a la larga es más económico porque ahorra mucho en calefacción o refrigeración del aire.

El fomento de la eficiencia energética en la edificación constituye una parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias para el cumplimiento de los compromisos del Protocolo de Kyoto y otras políticas del Gobierno como es la Estrategia de Eficiencia Energética aprobada por el Gobierno español en 2003, con el nombre de E4.

Desde hace décadas ha emergido un interés creciente por promover la eficiencia energética en el sector de la edificación puesto de manifiesto en diferentes Directivas Europeas. Ya que se ha comprobado que este sector tiene un alto potencial de ahorro cuando se optimiza la utilización de la energía solar para suplir los requerimientos energéticos (Commission of the EC, 1990).

Considerando este contexto, en España se ha aprobado el nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE) que “es el marco normativo por el que

se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidos sus instalaciones, para satisfacer los requerimientos básicos de seguridad y habitabilidad” en desarrollo de lo previsto en la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE) (CTE, 2006). El CTE define y desarrolla los requisitos de ahorro de energía a través del documento básico DB HE cuyo objetivo es conseguir reducir su consumo y asimismo que una parte de dicho consumo proceda de fuentes de energía renovables. Este documento DB HE contempla cinco exigencias básicas:

HE1: Limitación de la demanda energética.

HE2: Rendimiento de las instalaciones térmicas.

HE3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.

HE4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria.

HE4: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

El nuevo CTE dentro del apartado de exigencias respecto a la Demanda Energética (CTE-DE), presenta una actualización de la Normativa de Aislamiento Térmico que introduce mejoras respecto a la anterior norma relativa a la eficiencia energética NBE-CT-79 (Norma Básica de la Edificación, Condiciones Térmicas en los Edificios) (NBE-CT-79, 1979). CTE-DE plantea dos metodologías alternativas para implementar la norma: la denominada Opción Prescriptiva o método de cálculo simplificado de aplicación manual y la Opción Prestacional o método general que se implementa a través de un programa informático. El uso del método simplificado está especialmente indicado para edificios morfológicamente sencillos, con porcentajes de acristalamiento comunes, de uso residencial o tamaño reducido, y en casos en los que no se utilicen componentes innovadores que no están

explícitamente contemplados en la misma. Mientras que la opción prestacional cubre las restantes situaciones.

La opción prescriptiva presenta ciertas analogías con la NBE-CT-79, si bien incorpora mejoras con respecto a esta como son: considerar la inercia térmica en el caso de componentes opacos y la ganancia solar en el caso de los componentes transparentes, definir más zonas climáticas (doce en lugar de cinco), contemplar los distintos regímenes de calefacción y refrigeración que se presentan en las localidades españolas, entre otras.

En la opción prestacional se utilizan programas de simulación dinámica, para evaluar la demanda energética anual del edificio y compararla con aquella de un edificio de referencia que cumple los requerimientos mínimos exigidos, el cual es generado por la herramienta de cálculo en función del clima, orientación, porcentaje de acristalamiento, etc.

El interés por potenciar la eficiencia energética ha sido también reflejado en el gran número de estudios que han sido publicados relativos al análisis teórico y experimental de edificios y estrategias de ahorro energético en una gran diversidad de climas, cuyo objetivo final es entender el comportamiento, la relación y la importancia relativa de los elementos constructivos en un determinado entorno, lo cual permite conseguir un comportamiento óptimo de los edificios estudiados a través de una selección adecuada de las variables del diseño y las condiciones de uso.

Los modelos que abordan el problema directo, son utilizados normalmente para simular teóricamente el comportamiento térmico de un sistema en función de las leyes físicas relativas a los fenómenos de

transmisión de calor, los parámetros del diseño e información sobre el entorno. Una amplia variedad de modelos de simulación ha sido desarrollada durante los últimos años y existen en el mercado programas informáticos que facilitan su implantación práctica. Estos presentan limitaciones como por ejemplo la falta de modelos para determinados componentes constructivos, la dificultad de una validación rigurosa o el desconocimiento o falta de información sobre elementos del propio sistema, entre otras.

Por otra parte puede hacerse un análisis energético empírico basado en el registro de datos experimentales o monitorización. La monitorización presenta diversas aplicaciones, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Por un lado, es útil para la validación, desarrollo y mejora de códigos de simulación (mediante la comparación de los resultados teóricos y experimentales).
- Por otro lado, los métodos que abordan el problema inverso, también llamados comúnmente métodos de identificación de sistemas, plantean la modelización y caracterización energética del sistema en función de los datos experimentales.

Una gran cantidad de estudios han sido publicados relativos a la simulación energética de cerramientos constructivos (problema directo) (Mitchell y Beckman, 1995), existiendo menos publicaciones relativas a la aplicación del problema inverso (Andersen y col. 2000).

Los métodos de identificación de sistemas se presentan como una potente herramienta en diversas aplicaciones, como por ejemplo (Heras, 2004):

- Caracterización energética empírica de edificios. El desarrollo de una metodología apropiada y fiable permitiría realizar auditorías energéticas que podrían llegar a implantarse legalmente.
- Observación de malas funciones de los edificios, de modo que se pudieran corregir mediante rehabilitaciones energéticas eficaces.
- Desarrollo de procedimientos de control de los sistemas de acondicionamiento para la optimización de la respuesta térmica del edificio.

“Cada uno de estos objetivos requieren esfuerzos encaminados en diferentes líneas y que hoy por hoy están todas ellas en fase de investigación, si bien ya existen herramientas útiles que se están aplicando” (Heras, 2004).

La complicada situación energética y medioambiental actual acentúa la importancia que tiene la edificación en el consumo total de energía y recalca la necesidad de proyectar una arquitectura que consuma y contamine lo menos posible. Para ello es necesario diseñar edificios con un alto nivel de eficiencia.

Por estas razones desde hace décadas ha emergido un interés creciente por promover la eficiencia energética en el sector de la edificación, desarrollando y difundiendo la utilización de las técnicas solares pasivas y activas para su acondicionamiento térmico.

Para determinar la eficiencia energética de un edificio se debe estudiar cual es su comportamiento en función del clima, de la orientación y de los componentes de cada edificio.

Respecto a las protecciones del hombre contra las condiciones externas, sean frío, calor, lluvia o viento en los países "desarrollados" y tecnológicamente más avanzados, tal papel se confía a la envolvente del edificio y a los sistemas activos.

A tales procesos, en especial modo para la iluminación artificial, la calefacción y la producción del agua caliente sanitaria, y sobretodo para el acondicionamiento, se le dedica una buena parte, aproximadamente una tercera parte del consumo mundial de la energía, siendo la mayor parte importada de los países productores.

Por lo tanto el bienestar total de los usuarios y el ahorro energético son requisitos esenciales para cada tipología de edificio, objetivos éstos a perseguir tanto en las nuevas construcciones, como en la rehabilitación de las mismas.

Es necesario adoptar una actitud comprometida e imponerse en reducir los consumos en el sector de la edificación, responsable aproximadamente de la tercera parte del consumo de energía nacional. Es en esto campo donde podrán ser obtenidos ahorros sensibles de la energía en poco tiempo, para la calefacción y, sobretodo es el requisito, en extensión durante los últimos años, para el acondicionamiento en verano.

Para conseguir los ahorros energéticos que aseguren al mismo tiempo el bienestar de los usuarios, no existe una solución óptima, ya que es necesario conciliar los requisitos de calidad total del ambiente y de control energético. Para obtener esta situación intermedia son necesarias adoptar opciones apropiadas en el proyecto y en las tecnologías constructivas así como en los elementos de la envolvente, por ejemplo el uso de aislantes térmicos siempre más anchos.

A nivel internacional existen ejemplos significativos que han querido empezar este camino en realizaciones concretas de edificios ejemplares en varias partes del mundo.

Se puede ahorrar energía hasta un 80% respecto a una construcción tradicional, por medio de un planeamiento urbanístico y de una construcción apropiada sin importantes cambios técnico-constructivos de la envolvente del edificio.

En la edificación, es necesario recuperar criterios de eficiencia energética en el diseño y en la rehabilitación de edificios, además de aprovechar los mismos para producir energía de forma limpia y descentralizada que reduzcan la demanda externa de energía del edificio.

Las técnicas naturales para calefacción cuentan con una fuente de calor importantísima como es la radiación solar. Aprovechando la radiación solar convenientemente, el consumo energético de un edificio en invierno se reduce drásticamente. Pero en el caso de la refrigeración natural para el verano no existe un foco frío equivalente al foco caliente que es el Sol para la calefacción. En climas mediterráneos y continentales, como es el caso de la

mayoría del territorio español, los edificios han de contemplar ambas estrategias: calefacción y refrigeración natural. En el caso de refrigeración natural, al no existir un foco frío claro, es necesario desarrollar todo tipo de estrategias y sistemas que hagan más versátil la aplicación de esta técnica de acondicionamiento.

Por lo tanto es necesaria la investigación, el desarrollo y divulgación de viejas y nuevas técnicas naturales de acondicionamiento térmico, destacando la refrigeración natural para la edificación que contribuya al ahorro energético de los edificios para alcázar el confort térmico.

1.2. La fachada ventilada.

Las pérdidas y las ganancias de calor a través de las fachadas tienen una gran influencia en los consumos anuales de calefacción y refrigeración de los edificios, especialmente significativa en edificios aislados y de gran altura, característicos de las nuevas zonas de actuación urbanística.

Las fachadas ventiladas son sistemas que aún están siendo caracterizados, que permiten múltiples configuraciones, y que ya esta siendo incluidas en el diseño de edificios de nuevas construcción, como en rehabilitaciones, gracias a una de las ventajas más atribuidas a la fachada ventilada, que es la reducción de la carga térmica de climatización del edificio gracias al efecto chimenea inducido por la radiación solar en la cámara ventilada.

En concreto, en las fachadas ventiladas de juntas abiertas es muy difícil prever su comportamiento y su funcionamiento.

Y, a nivel normativo, todavía no se ha establecido como poder introducir su comportamiento el CTE, dado que no se dispone de herramienta de cálculo y dimensionado completa y fiables. Los programas promovidos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y por el Ministerio de Vivienda que permiten verificar la demanda de energía de los edificios así como la eficiencia energética de los mismos son: el programa LIDER que verifica el cumplimiento del DB-HE1 por la Opción General del edificio; y el CALENER que determina el nivel de eficiencia energética del edificio. Ninguno de los dos prevé la introducción de elementos singulares como puede ser una fachada ventilada de juntas abiertas.

La mayoría de los programas internacionales de simulación energética de edificios (DOE-2, TRNSYS, Energy-Plus) permiten tener en cuenta la influencia del viento en el cálculo de los coeficientes de convección exterior para las diferentes fachadas, sin embargo, debido a la dificultad que entraña la predicción del flujo alrededor de los edificios concretos es una práctica común considerar correlaciones constantes en función de la velocidad del viento, sin tener en cuenta las variaciones en función de las diferentes orientaciones, así como la variación en las mismas fachadas.

El sistema de fachada ventilada de juntas abiertas consiste en disponer sobre el cerramiento convencional de ladrillo (u otro tipo de material que sirva de soporte) una capa de material aislante y una estructura portante de la que se cuelgan unas losas o aplacados (de materiales muy diversos: metales, cerámicos, compuestos, etc...), conformando la cara vista de la fachada. Al colocarlas de esta forma, separadas de la pared trasera, aparece una cámara entre ambos elementos, que además es ventilada al estar en contacto con el aire exterior por medio de las juntas de dilatación de las losas. Estas juntas

de dilatación se disponen tanto en vertical como en horizontal, para absorber las deformaciones ocasionadas por los cambios de temperatura ambiente.

La radiación solar activa sobre este tipo de cerramiento genera la convección en la cavidad, creándose una corriente ascendente de aire que extrae calor por ventilación. De esta forma se consigue reducir la temperatura de la pared y la ganancia de calor hacia el interior del edificio reduciéndose en consecuencia la demanda de energía para la climatización del edificio.

El propósito del trabajo, que se presenta en esta memoria de tesis, es examinar el funcionamiento de la fachada ventilada para poder comprobar si se puede considerar realmente un elemento bioclimático, es decir, capaz de aprovechar la radiación solar de forma pasiva y activa para ahorrar energía. Además la validación del modelo teórico permitirá su uso por siguientes investigaciones sobre este tipo de sistema de construcción.

1.3. Objeto de la tesis

El objeto general que se presenta en esta memoria de tesis, es aportar una metodología de evaluación energética de las fachadas ventiladas de juntas abiertas mediante el análisis de medidas experimentales y simulaciones numéricas orientadas a la investigación del funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas expuesta a la radiación solar en periodo de verano y de invierno.

Para ello, se realizará un estudio usando un programa de simulación numérica y, en paralelo, se realizarán medidas experimentales orientadas a validar los resultados numéricos.

Posteriormente se ajustaran y validaran los modelos teóricos para permitir su uso en siguientes investigaciones sobre este tipo de sistema de construcción.

Las fases concretas de que consta este estudio son básicamente tres:

i) **Modelización numérica** de los fenómenos que se producen en el funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas. Se ha planificado en torno a tres cuestiones básicas:

a) **Discretización espacial, tanto bidimensional como tridimensional, de una fachada ventilada de juntas abiertas.**

La discretización espacial tiene gran importancia a la hora de obtener resultados numéricos fiables, tanto por la limitación en cuanto a la descripción geométrica del dominio de estudio, como

porque condiciona y limita la validez de la discretización temporal. El estudio que se lleva a cabo no pretende una descripción a fondo de las características de las distintas capas límite que aparecen en las zonas de contacto del fluido con las superficies sólidas. Los efectos de éstas se incluyen utilizando un modelo viscoso apropiado. Por otro lado, el resultado de los cálculos mediante la discretización bidimensional de la geometría ha de ser validado con algún resultado experimental para poder valorar los efectos que la simplificación de la dimensión del problema introduce en dichos resultados.

b) **Cálculo numérico bidimensional.** Este cálculo pretende captar de forma aproximada la mayoría de los fenómenos que se presentan en la realidad y establecer una comparación con resultados experimentales.

c) **Cálculo tridimensional.** Se trata de extender el cálculo buscando una mejora en la descripción que el modelo hace del flujo real, s siempre tridimensional. Se comparan los resultados obtenidos mediante dicho modelo tridimensional con los correspondientes obtenidos experimentalmente.

Se construyen primero con ayuda de un ordenador varios modelos de la fachada ventilada objeto de estudio. Estos modelos se resuelven en régimen estacionario, con temperaturas exteriores e interiores constantes, suponiendo distintas intensidades de radiación solar y con viento en calma, con ayuda del programa CFD Fluent.

Como resultados se obtienen los campos de temperatura del aire en el interior de la cámara ventilada, así como las temperaturas superficiales del revestimiento exterior (las plaquetas) y las temperaturas superficiales del cerramiento convencional de ladrillo. Sirven estos últimos como variables de comparación con los datos reales, permitiendo investigar la bondad de los modelos.

ii) *Estudio experimental* orientado a la obtención de los fenómenos que se desarrollan en el funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas.

iii) *Comparación de los resultados numéricos y experimentales* para extraer las correspondientes conclusiones, dando lugar a una mejor comprensión de los parámetros importantes en el funcionamiento y en la forma en que afectan en la operación normal de una fachada ventilada de juntas abiertas.

Los distintos estudios se distribuyen a lo largo del texto según el esquema que se explica a continuación en el apartado 1.4 de este capítulo.

El estudio de este tipo de cerramiento es necesario dado que una de las ventajas más atribuidas a la fachada ventilada es la reducción de la carga térmica de climatización del edificio gracias al efecto chimenea inducido por la radiación solar en la cámara ventilada.

Vale la pena hacer frente a estos tipos de estudio sobre este tipo de cerramiento que está ganando terreno en el mercado, tanto en obra nueva

como en rehabilitaciones, adquiriendo siempre más valor cultural y arquitectónico.

El sistema de fachada ventilada de juntas abiertas consiste en disponer sobre el cerramiento convencional una capa de material aislante y una estructura portante de la que se cuelgan unas plaquetas, conformando la cara vista de la fachada.

1.4. Planificación de la tesis.

El trabajo que se presenta en esta memoria se divide en seis capítulos más una introducción y la bibliografía.

En la introducción, además de la premisa y el objetivo de la tesis se ha descrito el estado del arte de las investigaciones experimentales y teóricas llevadas a cabo sobre el estudio de fachadas ventiladas.

En el capítulo 2 (“Fundamentos teóricos”) se han introducidos los fundamentos físicos y matemáticos necesarios para el desarrollo de la investigación.

En el capítulo 3 (“Evolución de la Técnica”) se ha dibujado un panorama histórico evolutivo y tecnológico del desarrollo de los sistemas de fachada ventilada determinando sus puntos críticos al fin de definir un marco de prestaciones lo más completo posible.

En el capítulo 4 (“Experimentación real en una fachada ventilada de juntas abiertas”), se han descrito la metodología y el planteamiento de la monitorización llevada a cabo sobre la fachada ventilada de juntas abiertas objeto del estudio. Así como el análisis de los resultados obtenidos de la toma de datos.

En el capítulo 5 (“Modelización fluidodinámica de una fachada ventilada de juntas abiertas”) se han descrito el programa de simulación y la metodología empleados para la creación de los modelos matemáticos utilizado por la descripción de los fenómenos que actúan en el sistema de

fachada ventilada de juntas abiertas. Partiendo desde los ejemplos encontrados en la literatura se han generados dos modelos que describen el funcionamiento detallado de la fachada ventilada de juntas abiertas objeto de este estudio.

En el capítulo 6 (“Validación del modelo fluidodinámico con datos experimentales y termografías”) se han comparados los datos experimentales con los datos reales al fin de validar el modelo creado por la fachada ventilada de juntas abiertas objeto de estudio.

En el capítulo 7 (“Conclusiones”) se resumen y comentan los resultados obtenidos en las diferentes etapas del trabajo que se presenta en esta memoria y se ha trazado un panorama de los temas que quedaron abiertos para futuras investigaciones.

1.5. Estado del Arte.

En este párrafo se presenta la revisión bibliográfica realizada para la elaboración de esta memoria. Esta información se ha organizado básicamente de forma cronológica. En el primero de los grupos se han incluido los textos generales y las investigaciones realizadas con técnicas experimentales. En el segundo grupo se han reseñado las publicaciones basadas en modelizaciones numéricas.

Las publicaciones científicas en fachadas ventiladas son escasas y en especial existe poca bibliografía técnica orientada al estudio de fachadas ventiladas de juntas abiertas. Esta bibliografía en su mayoría está limitada al análisis de soluciones constructivas, así como a la investigación sobre las características de los materiales empleados.

El desarrollo, análisis y caracterización de las fachadas ventiladas va por detrás de su realidad, ya que esta técnica se está aplicando actualmente en edificios de nueva construcción y además en obras de rehabilitación, sin disponer de herramienta de cálculo y dimensionado completa y fiables. Las investigaciones muestran los resultados de experiencias con diferentes tipos de fachadas ventiladas, pero la versatilidad de las propuestas es muy alta.

A continuación se hace un repaso de las publicaciones (libros, artículos, etc.) que existen sobre el tema, separándolos entre experimentales y teóricos. Algunos de estos trabajos solo tratan uno de estos aspectos, pero las últimas publicaciones suelen conjugar la parte experimental con otra de modelización analítica. Por la escasez de investigaciones sobre fachadas ventiladas de juntas abiertas se considera útil basarse también en trabajo

sobre chimeneas solares y fachadas de doble piel en vidrio; ya que en estos sistemas se producen los mismos fenómenos físicos.

Investigaciones experimentales

- M. D’Orazio (D’Orazio, 1994), publicación de los datos experimentales de un trabajo sobre el comportamiento termohigrométrico de algunos tipos de fachadas “abrigada” y ventilada de ladrillo en ocho ciudades italianas.

- C. Balocco (Balocco, et. al., 2001, 2002) publica los resultados experimentales utilizados para la validación de un modelo analítico utilizado para simular una fachada ventilada en ladrillo con orientación sur situada en Florencia. Los parámetros medidos fueron:
 - Temperaturas
 - Flujos de calor

- J. Martí Herrero (J. Martí Herrero, 2006) realiza un trabajo experimental en una chimenea solar con inercia térmica y superficie captadora externa de 3.5 m de altura y 1m de ancho. La superficie captadora es una superficie acristalada de cristal de 0.04 m de grosor; estas características se basan sobre trabajos anteriores de Bouchair (Bouchair), Hirunlabh (Hirunlabh ,et. al. 1999) y Chen (Chen, et. Al., 2003). Sobre esta chimenea se realiza

una monitorización dinámica con tomas de medidas de los siguientes parámetros:

- Temperaturas
 - Velocidad del aire
 - Radiación solar global sobre superficie vertical
 - Flujos térmicos a través del muro
- Corgnati, Perino, Serra (2006) publican los resultados de la monitorización de una fachada activa de doble piel de vidrio. Los resultados son de la monitorización realizada en una fachada transparente activa de doble piel de vidrio en condiciones reales de funcionamiento. Los principales objetivos de la investigación fueron: evaluar las características reales de la fachada, tanto en términos de ahorro energético como para obtener un conocimiento más detallado de su comportamiento termo-fluido-dinámico. El componente de análisis consta de una fachada con ventilación mecánica integrado con un sistema de HVAC. Se midieron los siguientes parámetros por un periodo de dos años:
- Temperaturas
 - Flujos de calor
 - Velocidad del aire

Investigaciones Teóricas

El desarrollo de modelos teóricos de mecánica de fluido (CFD) ha ido aumentando según ha mejorado la potencia de cálculo de los ordenadores.

Los modelos CFD para fachadas ventiladas se suelen emplear para valorar el comportamiento de un caso específico, con una configuración específica.

Como ejemplos de investigaciones computacionales hay un cierto número de publicaciones sobre fachadas ventiladas, especialmente fachadas fotovoltaicas, véase B. Moshfegh y M. Sandberg (1998). Pero se trata de fachadas sin juntas abiertas, con aberturas exclusivamente en la parte inferior y superior de la fachada.

El comportamiento térmico y fluidodinámico de este tipo de soluciones es sustancialmente diferente y, tanto los resultados obtenidos como los métodos de cálculo desarrollados, son solamente aplicables en parte.

Con respecto a los fenómenos parciales existen algunas publicaciones orientadas al aprovechamiento pasivo de la radiación solar en fachadas. Estos son, por ejemplo: Bhandari y Bansal (1994) o N.K.Bansal et al. (1996); y otras sobre la disipación de calor, entre las que se pueden citar las siguientes: M.Ciampi et al., (2003) , Lorente (2002) , C.Balocco (2002) y C.Balocco (2004) .

La publicación más reciente y la única que trata la fachada de juntas abiertas es la de M. González (González, et al., 2008), presenta el estudio numérico del comportamiento energético y fluido dinámico de una fachada ventilada de juntas abiertas analizada mediante simulaciones de CFD. El modelo presentado es un modelo 3D de dimensiones: 2,4 m de altura, 1,2 m de ancho, juntas verticales de 5 mm y horizontales de 2,5 mm. El modelo considerado consta de un aplacado exterior de losas de mármol de 1 cm, cámara de aire de 5 cm y muro trasero aislado de 13 cm.

Los trabajos de investigación desarrollados hasta ahora en fachadas ventiladas, muestran dos direcciones básicas: trabajos experimentales y computacionales. Inicialmente hay más trabajos experimentales, y a partir del 2002 aparecen trabajos computacionales. Se da el caso que las fachadas ventiladas pueden ser de diferentes tipos y configuraciones, ya sea por el tipo de material, o por la existencia o menos de juntas de dilatación entre las losas del revestimiento exterior. Estas variedades de topologías genera que existan dos tipos de estudios: los que tratan de encontrar expresiones generales que describan el comportamiento térmico de cierta gama de fachadas ventiladas o los trabajos específicos desarrollados por ingenierías para evaluar fachadas ventiladas particulares, empleando CFDs.

Los trabajos experimentales aportan criterios de diseño de la monitorización tales como los tipos de sensores a utilizarse y los parámetros a evaluar.

Los trabajos teóricos, como ya se ha comentado, son pocos los publicados y se aplican, la mayoría de los casos, para situaciones singulares y a fenómenos parciales. Basándose en la única publicación computacional sobre fachada ventilada de juntas abiertas, esta debe ser tratada como un conjunto de distintas zonas que represente el dominio del problema. En este caso las diferentes partes que componen la pared, son respectivamente: losas, cámara de aire y pared trasera, así como una parte del aire ambiente exterior a la pared, lo que evita suponer un coeficiente de transmisión de calor entre las losas y el propio aire.

Con estas consideraciones se comienza el desarrollo de un modelo numérico validado experimentalmente, para la descripción del comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas.

2. Fundamentos Teóricos.

2.1. Introducción.

En este capítulo se introducen los fundamentos físicos y matemáticos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Se hace, un resumen de los fenómenos del intercambio de calor en edificios y de los parámetros que caracterizan a un edificio respecto a estos fenómenos. Asimismo se presentan los parámetros energéticos simplificados, de uso más frecuente en el sector de la edificación, justificando las simplificaciones asumidas en estos parámetros y discutiendo la validez de las mismas. En particular, los parámetros para caracterizar térmicamente un edificio pretenden:

- Proporcionar una descripción adecuada de los procesos de transmisión de calor en el edificio considerado en su conjunto como un sistema energético.
- Contemplar los beneficios al sector de la edificación, considerando los parámetros requeridos en el marco de la normativa referente a condiciones térmicas de edificios.

En una fachada ventilada de juntas abiertas se dan los tres mecanismos básicos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, al igual que ocurre en un cerramiento convencional con cámara de aire estanca. Pero los flujos de calor y los balances térmicos son bastante diferentes.

2.2. .Confort en verano.

El acondicionamiento energético de los edificios trata de alcanzar en su interior el confort térmico a que está acostumbrado el ser humano. Este concepto de confort depende de variables físicas tales como la temperatura, la humedad relativa, el movimiento y la calidad de aire interior, pero indudablemente también depende de las preferencias personales de los ocupantes de los edificios.

Los valores objetivos estimados de confort humano en verano son los siguientes:

- Temperatura: 24-26 °C
- Humedad relativa: 40-50 %
- Movimiento del aire: 0.25-0.5 m/s

Durante el verano se alcanza, en ciertas regiones de España, valores superiores a los 40 °C de temperatura ambiente, debido en parte a la fuerte radiación solar que alcanza los 1000 W/m² en las horas centrales del día.

La humedad relativa depende fuertemente de la geografía, así no es raro encontrar un 80% de humedad en la costa o un 30 % en Sevilla. El cuerpo humano disipa gran cantidad de calor a través de la sudoración de la piel, por evaporación. La humedad relativa del aire afecta a este mecanismo de refrigeración del cuerpo humano, ya que una baja humedad relativa propicia la

evaporación del sudor, mientras que esta disminuye en ambientes de alta humedad.

El movimiento del aire sobre la piel, ayuda a disipar mayor cantidad de calor, creando una sensación térmica de menor temperatura que la propia del ambiente. Velocidades del aire superiores a 0.5 m/s son molestas, y más desagradables cuanto mayor es la temperatura ambiente. La falta de movimiento de aire también genera una sensación de ahogo que resulta no confortable.

2.3 Refrigeración natural.

En climas cálidos, el consumo energético para acondicionar los edificios durante el verano es muy importante. De hecho en España, la mayor demanda energética eléctrica mensual se produce en los meses de verano frente a los de invierno. El consumo eléctrico máximo registrado supone un incremento del 4.5% respecto al máximo. Este incremento en la demanda viene asociado al acondicionamiento térmico de los edificios mediante aparatos eléctricos.

Actualmente la venta de aparatos de aire acondicionado aumenta considerablemente cada verano. El consumo eléctrico de estos sistemas aumenta de un 5% a un 7% por cada grado de temperatura que se quiera descender. Se hace imprescindible introducir las técnicas de refrigeración natural en la edificación, que en unos casos serán complementarias a los sistemas de acondicionamiento eléctrico, y en otros serán suficientes por si mismas para alcázar el confort interior.

El propósito de la refrigeración natural es enfriar el edificio, desde el aprovechamiento de la interacción entre el entorno y el edificio. Para ello es necesario diseñar el edificio teniendo en consideración la climatología del lugar donde será construido.

Existen diferentes técnicas, estrategias y sistemas naturales de refrigeración de manera que siempre satisfarán las diferentes necesidades y circunstancias de cualquier edificio en proyecto.

El concepto de refrigeración natural se sostiene sobre dos objetivos fundamentales:

- Evitar ganancia de calor desde el exterior. La incidencia de la radiación solar sobre la edificación produce un aumento de la temperatura de sus componentes y por tanto del aire interior. El sombreado trata de evitar esta ganancia de calor por radiación solar y el aprovechamiento de la inercia térmica evita que la onda térmica alcance el interior del edificio.
- Aprovechar los sumideros de energía que ayuden a disipar al excedente térmico de la edificación. La disipación de calor de la edificación se puede provocar aprovechando los procesos de transferencia de calor del edificio hacia el exterior a través de pérdidas radiativas (sistemas radiativos), evaporativas (sistemas evaporativos), convectivas (ventilación natural) y absorción por masa térmica (inercia térmica y tubos enterados).

2.4 Ventilación natural.

La ventilación natural ha sido empleada como técnica de refrigeración natural durante miles de años, pero ha sido desplazada en las últimas décadas con la aparición y la comercialización de los sistemas mecánicos de ventilación.

La ventilación natural aprovecha las diferencias de presión del aire producidas por diferencias de temperatura y los vientos, para generar una corriente de aire en el interior del edificio con dos claras funciones:

- Aportar un mecanismo de transporte de calor y masa
- Aportar una calidad del aire interior adecuada, eliminando o diluyendo los contaminantes.

Como técnica de refrigeración natural, la ventilación natural es interesante por la capacidad de aportar un mecanismo de transporte de calor y masa, a través del movimiento del aire en el interior del edificio. De esta manera la ventilación natural emplea el aire de la atmósfera como sumidero de energía que ayuda a disipar el excedente térmico de la edificación. El calor acumulado por los componentes constructivos es el excedente térmico.

Parte de este calor es cedido al aire, en mayor grado cuando mayor sea la diferencia de temperatura entre el aire y el componente, y mayor si el aire está en movimiento debido a las pérdidas convectivas de calor de los elementos.

Por otro lado como ya se ha explicado antes, una corriente de aire menor de 0.5 m/s ayuda a la evaporación cutánea de los ocupantes, creando una sensación térmica de menor temperatura que la existente en el ambiente.

La ventilación natural es producida por dos fenómenos; viento y convección, que dependiendo de que estrategia se emplee se podrán favorecer en mayor o menor medida.

Ventilación producida por el viento.

El viento penetra en el edificio por los huecos existentes, normalmente en dirección horizontal, ventilando su interior si es que el diseño lo permite. Empleando chimeneas convenientemente orientadas se puede conducir el viento al interior del edificio de forma vertical. La interacción del viento con el edificio genera unas diferencias de presión atmosférica entorno a la envolvente, que pueden ser aprovechadas para producir ventilación en el interior del edificio. Por esto, es importante considerar los vientos predominantes (dirección y velocidad) en los lugares de estudio.

Ventilación producida por convección.

La convección es el movimiento de masa de aire debido a sus diferentes densidades (o temperaturas), que generan una diferencia de presión. En este caso no se depende de un fenómeno climatológico como es el viento, si no de un

fenómeno de transporte de calor y masa, que sucede entre elementos a diferente temperatura. Cuanta mayor sea la diferencia de temperatura, mayor será la convección.

Existen dos fenómenos convectivos diferentes de transferencia de calor. Hay que considerar la transferencia de calor convectiva entre las superficies y un fluido (aire), y la convección como movimiento de masa de aire provocado por la diferencia de densidades, conocido como efecto chimenea, donde el aire de mayor temperatura, al tener menor densidad, asciende.

En la ventilación natural hay que tener en consideración la calidad y temperatura del aire exterior que se va a introducir en el edificio, para reemplazar el aire interior. Interesa un aire de menor temperatura a la temperatura ambiente, y de menor calidad que el interior. Estas dos consideraciones son muy importantes en estos sistemas y no siempre son fácilmente alcanzables.

Para producir un movimiento del aire en el interior del edificio existen diferentes estrategias; ventilación simple, ventilación cruzada, chimenea de viento, torres de viento, muros Trombe.-Michel, chimeneas solares, captadores solares de aire, atrios ventilados, fachadas, ventiladas, etc.

2.5. Procesos físicos de intercambio energético en edificios y parámetros que los caracterizan.

Un edificio es un sistema termodinámico complejo (diabático, abierto, etc.) capaz de intercambiar energía térmica y masa con el entorno. La transferencia de calor a través de los cerramientos se produce a través de procesos de conducción, convección y radiación (ver figura 2.1. y 2.2.). Los fenómenos de intercambio de masa de aire a través de la envolvente del edificio se denominan procesos de infiltración y ventilación.

Existe mucha bibliografía que trata en profundidad estos fenómenos, seguidamente se incluye la bibliografía esencial utilizada en este trabajo de investigación. Chapman (1990), Incropera (1999), Kreith y Bohn (2002) presentan los fundamentos físicos de los fenómenos de transferencia de calor. Duffie y Beckman (1991) se centran en los procesos térmicos en los que la radiación solar se absorbe por una superficie captadora convirtiéndose en energía térmica, la cual es almacenada y/o directamente utilizada en una operación posterior: calentamiento de agua u otras aplicaciones. Streeter (1962) Landau y Lifshitz (1991), Etheridge y Sandberg (1996), Batchelor (1997), tratan los procesos de infiltración y ventilación. ASHRAE Fundamentals (1997) cubre los principios básicos y datos necesarios en el diseño y la modelización de sistemas pasivos y activos de calefacción y refrigeración de edificios.

En este apartado se resumen los fundamentos físicos de los procesos de intercambio energético en edificios y se introducen los parámetros que los caracterizan, que se consideran necesarios para el desarrollo de este trabajo. Este resumen se basa en las fuentes bibliográficas mencionadas en el párrafo anterior.

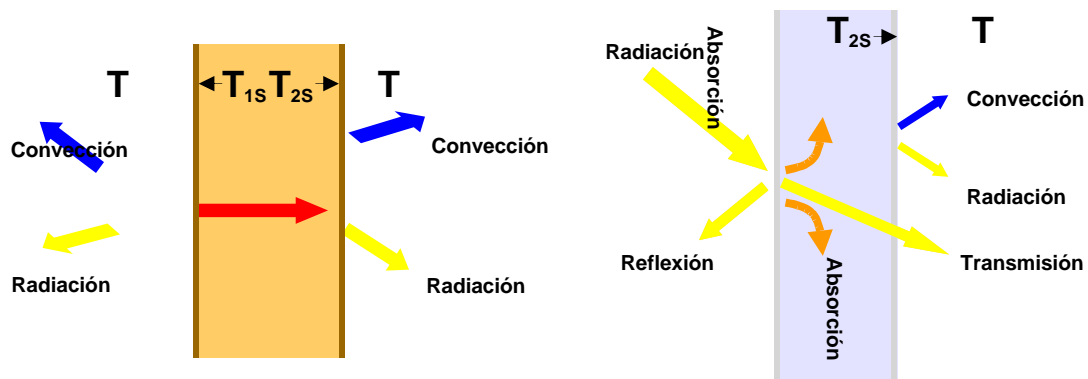


Fig.2.1. Fenómenos de transferencia de calor debidos a la diferencia de temperatura. (Imagen del autor).

Fig.2.2. Fenómenos de transferencia de calor debidos a la radiación. (Imagen del autor).

Radiación.

Todo cuerpo con una temperatura por encima del cero absoluto transfiere energía por radiación. La radiación térmica se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas que los constituyen. La transferencia de energía por radiación puede ser representada por ondas electromagnéticas o alternativamente por fotones. La radiación térmica se define

como la radiación electromagnética ente 10^{-1} y 10^2 μm . El flujo de energía por unidad de superficie radiante es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, según expresa la ley de Stefan-Boltzman:

$$\mathbf{j}_{rad} = e\sigma T_1^4 \quad (2.2.1)$$

Donde f_r es la velocidad de emisión de energía radiante por unidad de área, T_1^4 es la temperatura absoluta de la superficie emisora, σ la constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), e es la emitancia hemisférica, esta depende del material, del estado y de la temperatura de la superficie y también puede depender de la longitud de onda, toma valores en el rango $0 = e = 1$, en particular se denomina cuerpo negro aquel con $e = 1$, por otro lado se denominan superficies grises a aquellas para las e no depende de la longitud de onda. Queda implícito en la expresión 2.2.1 que la energía emitida en forma de radiación es independiente de las condiciones del medio circundante.

La radiación emitida por un cuerpo puede incidir sobre otro cuerpo, la velocidad a la que la radiación incide sobre un área unitaria del cuerpo se denomina irradiancia; cuando esto ocurre, parte de esta es reflejada, parte es absorbida y parte es transmitida. Estas fracciones de energía son interpretadas como propiedades de la superficie y dependen típicamente de la longitud de onda y dirección de la radiación incidente. Para describir y caracterizar estos

fenómenos se definen las siguientes propiedades (definiciones de acuerdo con la norma ASTM E 772):

- Reflectancia, r : cociente entre el flujo reflejado y el flujo incidente.
- Absortancia, a : cociente entre el flujo radiante o luminoso y el flujo incidente.
- Transmitancia, t : cociente entre el flujo radiante transmitido y el flujo incidente.

Todos estos parámetros son adimensionales y su valor está entre 0 y 1.

Aplicando la ley de la conservación de la energía resulta la siguiente relación:

$$r + a + t = 1 \quad (2.2.2)$$

Para un cuerpo negro (cuya emitancia es la máxima posible, $e=1$), toda la radiación incidente es absorbida por lo que $a = 1$ y $r = t = 0$. Por lo tanto la máxima radiación posible se emite por una superficie a una determinada temperatura cuando esta superficie es negra. En función de la definición de cuerpo negro, se define la emitancia e como el cociente entre el flujo radiante emitido por una muestra a una temperatura dada, y el flujo radiante emitido por un cuerpo negro a la misma temperatura bajo las mismas condiciones de medida geométricas y espectrales (norma ASTM E 772).

Para un cuerpo opaco $t = 0$ y:

$$r + a = 1 \quad (2.2.3)$$

En el caso de gases, la mayor parte tienen altos valores de t y bajos valores de r y a , en particular el aire a presión atmosférica es virtualmente transparente a la radiación térmica. Otros gases, especialmente el vapor de agua y el dióxido de carbono, pueden tener valores altos de absorción de radiación térmica, por lo menos a ciertas longitudes de onda.

Todas estas propiedades (a, r, t) pueden ser función de la longitud de onda y del ángulo de incidencia o dirección de salida, por lo que se distingue entre propiedades espectrales y totales (promediadas para todas las longitudes de onda), y entre propiedades direccionales y hemisféricas (promediadas para todas las direcciones).

La ley de Kirchhoff relaciona la emitancia y la absortancia de cualquier superficie opaca teniendo en cuenta consideraciones termodinámicas. Esta ley establece, que $eI = aI$, para cualquier superficie donde la radiación incidente es independiente del ángulo o la superficie es tal que eI y aI , no tiene dependencias direccionales (denominada superficie difusa).

La radiación térmica emitida que abandona una superficie por unidad de tiempo y de área se denomina Potencia Emisiva. Toda la radiación que abandona una superficie por unidad de tiempo y unidad de área se denomina Radiosidad, esta se diferencia de la potencia emisiva, en que esta incluye tanto

la energía reflejada como la emisión original. La radiación térmica que incide en una superficie (desde todas las direcciones) por unidad de tiempo y de área se denomina irradiación.

La potencia emisiva, radiosidad e irradiación de una superficie, dependen de la longitud de onda y por lo tanto se distinguen entre variables monocromáticas y totales; estas variables están relacionadas entre sí por las propiedades reflectivas, absorbentes y transmitivas de la superficie descritas previamente.

En térmica de edificios, resulta conveniente normalmente clasificar la radiación en función de su longitud de onda (λ), en radiación de onda larga, $\lambda > 0.76 \mu m$ (emitida por cuerpos a temperatura moderada) y radiación de onda corta, $\lambda < 0.76 \mu m$, (emitida por cuerpos a muy alta temperatura sol, bombillas, etc.).

Por otro lado en análisis térmicos de edificios es habitual asumir superficies grises debido a la ausencia de información sobre la dependencia de la emitancia con la longitud de onda, aunque debe tenerse en cuenta las limitaciones de esta suposición especialmente para temperaturas altas (ASHRAE Fundamentals, 1997). Además en estas aplicaciones suelen ser habituales las siguientes consideraciones sobre las superficies de los muros: superficies difusas, temperatura uniforme y la energía sobre la superficie también uniforme (Duffie y Beckman, 1991).

Intercambio radiativo entre la superficie del cerramiento y su entorno.

Mediante los procesos descritos, cada superficie intercambia energía con todas las superficies que le rodean. En este caso, el problema se reduce al intercambio directo de la energía entre dos superficies, es decir la fracción de la energía que abandona una superficie e incide directamente sobre la otra, sin tener en cuenta cual es la transferida por reflexión o rerradiación de otras superficies, que pueden estar presentes. Este flujo directo de energía entre las dos superficies se expresa en términos de factor de forma de la superficie i respecto a la superficie j (F_{ij}), que se encuentra mediante la determinación del intercambio entre los elementos diferenciales del área en cada superficie, y después realizando integraciones simultaneas sobre ambas superficies, de forma que el resultado depende exclusivamente de la geometría del problema.

Un caso particular a modo de ejemplo es el intercambio radiativo entre dos superficies grises finitas de áreas A_1 y A_2 que forman un recinto cerrado, en cuyo caso el intercambio radiativo se puede expresarse como:

$$q_1 = -q_2 = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (2.2.4)$$

En el caso de superficies paralelas e infinitas las áreas (A_1 y A_2) son iguales y F_{12} es la unidad, lo que representa que toda la radiación emitida por la superficie 1 incide en la superficie 2. Por lo que se tiene:

$$q_1 = \frac{\sigma A (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \quad (2.2.5)$$

Si se considera un objeto pequeño y convexo (superficie 1) rodeado por un gran cerramiento (superficie 2), entonces el cociente (A_1/A_2 tiende a cero y el factor de forma es la unidad), resultando:

$$q_1 = e_1 A_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (2.2.6)$$

Como se observa, en este caso q_1 es independiente de las propiedades del gran cerramiento y este no refleja nada de la radiación que emite el objeto pequeño por lo que el gran cerramiento se comporta como un cuerpo negro. Esto resulta de gran utilidad en sistemas en intemperie, por que permite simplificar el análisis del intercambio radiativo entre la superficie de interés y su entorno, según las siguientes consideraciones:

- En el caso de una superficie horizontal expuesta a la intemperie, el cielo puede considerarse como un cuerpo negro a temperatura T_C por lo que el intercambio radiativo entre una superficie horizontal y el cielo puede

obtenerse aplicando la relación 2.2.6, considerando la superficie horizontal como superficie 1 y sustituyendo T_2 por la temperatura del cielo. Diversos estudios presentan expresiones, con diversos grados de detalle y rangos de aplicabilidad, que proporcionan la temperatura del cielo en función de las magnitudes meteorológicas, atmosféricas o geográficas.

Lo cual resulta de gran utilidad ya que no es habitual disponer de medidas de la radiación de onda larga procedente del cielo. Por lo que la mayoría de las veces es necesario recurrir a la estimación de este valor.

Los métodos empleados para la estimación de esta magnitud se pueden clasificar en dos grandes grupos: los métodos teóricos que utilizan perfiles detallados de temperatura y composición atmosférica; y los modelos empíricos (Bliss, 1961; Kondratyev, 1969; Martin y Berdhal , 1984; etc.), que establecen correlaciones entre la temperatura de cielo o alternativamente emisividad aparente de cielo y distintas variables meteorológicas como la presión del vapor de agua o la temperatura del bulbo húmedo del aire medidas cerca de la superficie de la Tierra; estas correlaciones suelen ser establecidas para atmósferas sin nubes y estiman valores medios mensuales, diarios u horarios de T_c .

A modo de ejemplo, se presenta una de las expresiones mas simples y comúnmente utilizadas para la temperatura del cielo en función de la temperatura ambiente, la cual ignora la presión de vapor de la atmósfera (ASHRAE HVAC Applications, 1999):

$$T'_c = 0.0552T_e^{1.5} \quad (2.2.7)$$

donde ambas temperaturas son absolutas.

- En el caso de una superficie 1 intercambiando energía radiante con su entorno es posible definir la llamada temperatura media radiante, T_{mr} , como la temperatura equivalente tal que se verifique la ecuación 2.2.6. Esta temperatura puede expresarse en función de los factores de forma de cada una de las superficies que intercambian energía radiante con la superficie 1 (Oliveti y col., 2003).

En este tipo de aplicaciones resulta frecuente el uso de expresiones lineales aproximadas para el intercambio radiativo entre superficies (Duffie y Beckman, 1991), para ello se define el coeficiente de transferencia de calor por radiación como se expresa a continuación:

$$q_1 = A_1 h_r (T_2 - T_1) \quad (2.2.8)$$

De modo que en este caso:

$$h_{rad} = \frac{\sigma(T_2'^2 + T_1'^2)(T_2' + T_1')}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \epsilon_2)A_1}{\epsilon_2 A_2}} \quad (2.2.9)$$

En el caso de que los valores de T_1' y T_2' sean próximos, es posible estimar h_{rad} definiendo T como la media de ambas, sin que sea necesario conocer T_2' , en este caso:

$$h_{rad} = \frac{4\sigma T^3}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \epsilon_2)A_1}{\epsilon_2 A_2}} \quad (2.2.10)$$

A partir del coeficiente de transmisión de calor por radiación también es posible expresar la correspondiente resistencia térmica R_{rad} , al igual que en el caso de la conducción y la convección, como sigue:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A} \quad (2.2.11)$$

Así como la correspondiente conductancia térmica como sigue:

$$H_{rad} = \frac{1}{R_{rad}} \quad (2.2.12)$$

Como queda implícito en la ecuación 2.2.10 el coeficiente h_{rad} depende de temperaturas, propiedades radiativas y disposición geométrica del cerramiento respecto a su entorno, aunque este parámetro no tiene significado físico (ASHRAE Fundamentals, 1997).

Conducción.

Es el mecanismo de transmisión de energía interna a través de un cuerpo o de cuerpos en contacto mediante el intercambio de la energía cinética del movimiento de las moléculas por comunicación directa o por el flujo de electrones libres cuando se trata de conducción calorífica en los metales. Las leyes que gobiernan la conducción pueden expresarse en términos matemáticos concisos y en muchos casos el análisis del flujo calorífico puede abordarse analíticamente.

La relación fundamental que describe el flujo de calor por conducción queda descrita por la ley de Fourier, la cual expresa que la energía transmitida es directamente proporcional a la diferencia de temperatura y al área a través de la cual se transfiere.

Para un sistema unidimensional existen gradientes de temperatura a lo largo de una sola dirección coordenada y la transferencia de calor por conducción ocurre exclusivamente en esta dirección, en este caso la Ley de Fourier se expresa como:

$$j_{cond} = -I \frac{dT}{dx} \quad (2.2.13)$$

donde: jI es la densidad de flujo de calor en un punto, T es la temperatura, x la coordenada dimensional. La constante de proporcionalidad, I , es la conductividad térmica del material y es una propiedad que depende del propio material y no de la configuración geométrica. Se comprueba que la conductividad térmica depende de la composición química de la sustancia o sustancias que lo componen, de la fase (gaseosa, líquida o sólida) en que se encuentra, de su estructura cristalina si se trata de un sólido, de la temperatura y presión a que está sometido y de si es o no un material homogéneo.

Respecto a la dependencia de la conductividad térmica con la temperatura, es posible para muchos materiales aproximar este parámetro como una función lineal de la temperatura, también en diversas aplicaciones puede considerarse una conductividad térmica promedio para la diferencia de temperatura; en particular en térmica de edificios habitualmente esta dependencia es suficientemente pequeña como para despreciarla.

En el caso de que I pueda ser considerado constante para el rango de temperaturas que se da en el sistema y el flujo de calor sea estacionario y unidimensional a través de una pared plana de área A y anchura L , con diferencia de temperatura entre sus superficies ΔT , la relación 2.2.13 se expresa como:

$$q_{cond} = \frac{\Delta T}{L/AI} \quad (2.2.14)$$

En el estudio de procesos térmicos de edificios, es común definir la cantidad L/AI como la resistencia térmica R_{cond} que la pared ofrece al flujo de calor por conducción y la conductancia térmica como la inversa de la resistencia térmica, según queda expresado en las siguientes ecuaciones:

$$R_{cond} = \frac{L}{AI} \quad (2.2.15)$$

$$K_{cond} = \frac{AI}{L} \quad (2.2.16)$$

Estos parámetros permiten emplear analogías eléctricas, lo cual resulta especialmente útil para analizar sistemas de mayor complejidad, por ello estos conceptos son habitualmente generalizados a otros fenómenos de transferencia de calor.

Según la ley de Fourier, la dirección del flujo de calor, que es una cantidad direccional, es normal a las superficies isotermas y positivo en la dirección de temperatura decreciente (como se refleja en la relación 2.2.13).

Para un sistema general, el flujo de calor por conducción es una cantidad vectorial, expresada según la ley de Fourier como sigue:

$$\mathbf{j}_{cond} = -I\nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.2.17)$$

donde: ∇ es el operador nabla tridimensional y $T(x, y, z)$ es el campo escalar de temperaturas. Esta expresión es válida para un medio isótropo en el que la conductividad térmica es independiente de las direcciones de las coordenadas. Queda implícito en la ecuación 2.2.17 que el vector de densidad de flujo de calor se encuentra en una dirección perpendicular a las superficies isotermas.

En el caso de paredes de capas múltiples, además debe tenerse en cuenta que el contacto entre capas no es perfecto, debido a la rugosidad superficial, de forma que el contacto se produce en puntos discretos entre espacios huecos generalmente llenos de aire; de forma que el calor puede fluir a través de los puntos de contacto por conducción y a través de los huecos por convección y por radiación. La resistencia de contacto depende de la rugosidad de las superficies, de la presión que las mantiene unidas y de su temperatura. En la mayoría de los casos los valores de estas resistencias deben obtenerse experimentalmente, excepto en el caso metal-metal en que han sido desarrolladas muchas teorías para predecir el valor de estas resistencias. Sin embargo, no existe forma teórica de estimarla con exactitud, ni conjunto de estudios empíricos suficientemente extensos que proporcionen sus valores de forma generalizada (Jiménez, 2005).

Si bien, el flujo de calor a través de muros puede ser considerado unidimensional. El flujo de calor a través del suelo, no presenta un comportamiento unidimensional. A este respecto, Latta y Boileau (1969) que analizan empíricamente un sótano no aislado, muestran que las isotermas cerca de los muros no son líneas paralelas si no que se aproximan a líneas radiales centradas en la intersección entre el suelo y los muros; de modo que el flujo energético presenta aproximadamente formas concéntricas circulares (ver figura 2.3.). Este comportamiento se altera cuando se incorpora aislamiento a los cerramientos, en el caso de que el aislamiento fuera total, las isotermas serían lineales horizontales y paralelas al suelo, cuando el aislamiento es finito o parcial el flujo energético presenta formas entre circulares y verticales.

Respecto a la temperatura del terreno que puede ser utilizada para estimar el flujo de calor a través del suelo, diversos modelos han sido desarrollados. La estimación de esta temperatura no constituye un problema trivial, en particular su determinación en suelos homogéneos y continuos es considerada un problema clásico dentro de la teoría de la conducción de calor (Ingersol y Zobel, 1954; Kirkham y Powers, 1972), para su solución se debe considerar el problema de un sólido semi-infinito con fluctuaciones periódicas de la temperatura superficial, distintos estudios han analizado y validado empíricamente estos modelos (Kusuda, 1969).

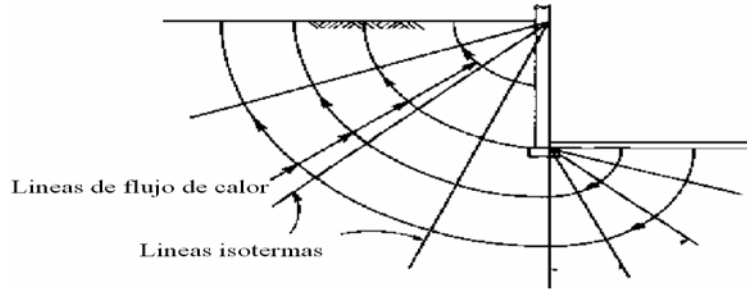


Fig.2.3. Flujo de calor a través del suelo. (ASHRAE 2001)

Wang (1979) y Bligh y col. (1978) observaron que las pérdidas de calor a través de un suelo de cemento se producen principalmente a través del perímetro en lugar de a través del suelo hacia el terreno; siendo el flujo de calor total aproximadamente proporcional a la longitud del perímetro en lugar de al área del suelo, lo cual queda representado mediante la siguiente ecuación para flujos a través del suelo:

$$q = F_2 P (T_i - T_e) \quad (2.2.18)$$

donde q es el flujo de calor a través del suelo, F_2 es el coeficiente de pérdidas de calor por longitud de perímetro que depende tanto del aislamiento como de la construcción de muros y suelo, (ASHRAE Fundamentals, 1999) provee valores tabulados de F_2 para construcciones típicas, P es el perímetro o borde expuesto del suelo, T_i y T_e las temperaturas de aire interior exterior.

Convección.

Es el mecanismo de transmisión de calor que se produce en un fluido debido al movimiento molecular aleatorio, denominado difusión o conducción, y al transporte de energía como consecuencia de los movimientos del fluido, producidos bien por medios artificiales o por las variaciones de densidad. Cuando el movimiento del fluido se produce por causas mecánicas externas se denomina al proceso convección forzada, mientras que si el movimiento del fluido se produce por diferencias de densidad creadas por aquellas de las temperaturas el proceso se denomina convección natural o libre. Se debe notar que tan pronto como existan diferencias de temperatura en el fluido se producen corrientes de convección naturales por lo que es virtualmente imposible observar la conducción de calor pura en un fluido.

Las leyes básicas de la conducción calorífica deben combinarse con las del movimiento del fluido con el fin de poder describir, matemáticamente, el proceso de la convección calorífica. Se trata de un fenómeno complejo para cuyo análisis se han aplicado diversas estrategias, entre las que se pueden señalar soluciones exactas o aproximadas de ecuaciones analíticas así como procedimientos empíricos. En particular, los fenómenos de convección quedan descritos por la ecuación de Navier_Stokes, cuya resolución analítica o numérica resulta una tarea compleja desde el punto de vista matemático y cuyas soluciones son muy sensibles a parámetros locales difíciles de conocer. Cabe destacar que el análisis matemático del sistema de ecuaciones diferenciales es,

quizás, uno de los campos mas complejos de la matemática aplicada (Chapman, 1990).

Seguidamente se presenta un resumen de los principales aspectos aplicables al intercambio energético a través de cerramientos constructivos. En este caso, resulta relevante la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando estos tienen diferentes temperaturas.

Como el movimiento del fluido es la característica principal de la convección respecto a la transferencia de calor, es necesario comprender algunos de los principios de la dinámica de fluidos con el objeto de describir los procesos de convección.

Cuando un fluido real se mueve a lo largo de una superficie sólida, se observa que su velocidad es nula en la superficie de la pared debido a las fuerzas de viscosidad del fluido y varia con la distancia a la misma, hasta un valor finito u_{∞} asociado con el flujo, tanto para convección natural como para forzada. Esta región del fluido se conoce como capa límite hidrodinámica o de velocidad. Además, si las temperaturas de la superficie y del fluido difieren, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varia de T_s en la superficie a T_{∞} en el flujo exterior, esta región es denominada capa limite térmica, pudiendo ser de dimensiones diferentes a la capa limite de velocidad.

La contribución a la transferencia de calor debida a la conducción o difusión domina cerca de la superficie donde la velocidad del fluido es baja. En particular en la superficie, donde la velocidad del fluido es nula, el intercambio energético se produce exclusivamente por conducción. Fuera de la capa límite, domina el transporte de energía causados por el movimiento del fluido.

De forma que, el estudio del flujo de calor por convección, desde una superficie sólida por medio de un fluido ambiente, exige el estudio de los principios de la conducción de calor, de la dinámica de fluidos y de la teoría de la capa límite. Numerosas referencias presentan en detalle el estado actual del conocimiento sobre estos temas, tanto desde el punto de vista teórico como experimental (Chapman, 1990; Incropera, 1999; Kreith y Bohn, 2002; etc.). Todos aquellos complejos factores relacionados con este estudio analítico pueden representarse de forma simplificada mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$q_{conv} = A\bar{h}_{conv}(T_s - T_\infty) \quad (2.2.19)$$

Donde q_{conv} es el flujo de calor por convección entre una superficie y un fluido, T_s es la temperatura de la superficie, T_∞ es la temperatura del fluido en un lugar alejado de la superficie, y \bar{h}_{conv} es denominado como coeficiente de transferencia de calor por convección promedio a través del área A de la superficie. El coeficiente de transferencia de calor por convección \bar{h}_{conv} no es una propiedad del material, y depende de la composición del fluido, de la geometría

de la superficie del sólido y de la hidrodinámica del movimiento del fluido a lo largo de la superficie.

La escala de valores de \bar{h}_{conv} encontrados para diferentes fluidos es muy diversa, reflejando la complejidad del proceso de convección y las dificultades para determinar este parámetro. En particular \bar{h}_{conv} para convección libre de aire suele tomar valores entre 5...25 W/m²K (Chapman, 1990).

Es posible definir a partir del coeficiente de transferencia de calor por convección la correspondiente resistencia térmica como sigue:

$$R_{conv} = \frac{1}{\bar{h}_{conv} A} \quad (2.2.20)$$

Del mismo modo se define la correspondiente conductancia térmica:

$$H_{conv} = \frac{1}{R_{conv}} \quad (2.2.21)$$

Existen diferentes relaciones empíricas que permiten estimar el coeficiente \bar{h}_{conv} , en función de los parámetros y variables característicos de la configuración, en particular de los siguientes: conductividad térmica del fluido λ , velocidad de corriente libre de fluido U_{∞} , densidad de fluido ρ , viscosidad de

fluido m , calor específico a presión constante c_p , coeficiente de dilatación del fluido b ($1/T_\infty$ para un gas ideal), diferencia de temperatura entre la superficie y la corriente libre, longitud de la superficie L . Estas relaciones empíricas, dependerán del tipo de intercambio (natural, forzado, mixto), del tipo de movimiento de aire (natural o turbulento) y evidentemente de la configuración superficial del sólido considerado. Por ejemplo el valor del coeficiente h_{conv} se puede deducir de la siguiente relación, tabulada experimentalmente:

$$Nu=f(Gr,Pr) \quad (2.2.22)$$

siendo Nu el número de Nusselt definido como (Kreith y Bohn, 2002):

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_c L}{k} \quad (2.2.23)$$

Pr el número de Prandtl y Gr el número de Grashof definidos como (Kreith y Bohn, 2002):

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} ; \quad Gr_L = \frac{r g b (T_s - T_\infty) L^3}{m} ; \quad (2.2.24)$$

La aplicabilidad de muchas de las expresiones empíricas está limitada por el rango del número de Reynolds sobre el que hayan sido determinadas. El número de Reynolds se define como (Kreith y Bohn, 2002):

$$R_{eL} = \frac{U_{\infty} L \rho}{\mu} \quad (2.2.25)$$

Seguidamente se indican algunas expresiones empíricas aplicables al intercambio energético a través de cerramientos constructivos.

Convección natural:

Para placas verticales:

$$\frac{\bar{h}_c L}{k} = 0.68 \text{Pr}^{\frac{1}{2}} \frac{Gr_L^{\frac{1}{4}}}{(0.952 + \text{Pr})^{\frac{1}{4}}} \quad 10 < Gr_L \text{Pr} < 10^8 \quad (2.2.26)$$

$$\frac{\bar{h}_c L}{k} = 0.13 (Gr_L \text{Pr})^{\frac{1}{3}} \quad Gr_L > 10^9 \quad (2.2.27)$$

Para placas horizontales con una superficie superior caliente o una superficie inferior fría:

$$\overline{Nu}_L = 0.54(Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}} \quad 10^5 < Gr_L Pr < 10^7 \quad (2.2.28)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15(Gr_L Pr)^{\frac{1}{3}} \quad 10^7 < Gr_L Pr < 10^{10} \quad (2.2.29)$$

Para placas horizontales con una superficie superior fría o una superficie inferior caliente:

$$\overline{Nu}_L = 0.27(Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}} \quad 10^5 < Gr_L Pr < 10^{10} \quad (2.2.30)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección natural según las ecuaciones 2.2.26-2.2.30 puede expresarse como:

$$\overline{h}_{conv} = k_1(T_s - T_\infty)^{k_2} \quad (2.2.31)$$

Convección forzada:

McAdams (1954) presenta la siguiente relación empírica para una superficie de 0.5 m².

$$h_{conv} = 7.2V^{0.78} \quad \text{Para } V > 5 \text{ m/s;} \quad (2.2.32)$$

$$h_{conv} = 5.7 + 3.8V \quad \text{Para } V < 5 \text{ m/s} \quad (2.2.33)$$

Watmuff y col. (1977) sugieren que es posible que en la expresión 2.2.33 estén incluidos los efectos de convección libre y radiación, por lo que establecen que esta ecuación, también para una superficie de 0.5 m², debería ser:

$$h_{conv} = 2.8 + 3.0V \quad (2.2.34)$$

Mitchell (1976) determina la expresión 2.2.35, suponiendo el edificio como una esfera cuyo diámetro es la raíz cúbica del volumen del edificio:

$$Nu = 0.42 Re^{0.6} \quad (2.2.35)$$

Kreith y Bohn (2002) presentan la siguiente relación para convección forzada y superficies planas:

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Si } Pr > 0.5 \text{ y } Re_L < 5 \times 10^5 \quad (2.2.36)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.036 Pr^{\frac{1}{3}} (Re_L^{0.8} - 23.2) \quad \text{Si } Pr > 0.5 \text{ y } Re_L > 5 \times 10^5 \quad (2.2.37)$$

Según las ecuaciones 2.2.32-2.2.37 el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada puede expresarse como:

$$\bar{h}_{conv} = k_1 V^{k_2} \quad (2.2.38)$$

Una dificultad que se encuentra en la práctica cuando se estima h_c como la medida de la velocidad del fluido en la corriente libre correspondiente a la capa límite de la superficie, por ejemplo en el caso de superficies exteriores de edificios se dispone normalmente de la velocidad de viento en la estación meteorológica.

Convección natural y forzada combinadas.

El análisis de la combinación de ambos efectos es una tarea muy compleja. Sin embargo en muchos casos prácticos uno de estos dos efectos es despreciable frente al otro por lo que solo es necesario tener en cuenta el efecto predominante. A este respecto, Duffie y Beckman (1991) recomiendan estimar ambos coeficientes y utilizar el máximo entre ambos. Por otro lado, Kreith y Bohn (2002) proponen considerar el orden de magnitud de la relación $G_r L / R_e L_2$ como estimación cualitativa de cual de estos efectos es predominante. En el caso de edificios, normalmente se considera convección natural en las superficies interiores y forzada en aquellas exteriores.

Fenómenos de intercambio de masa.

Los fenómenos de intercambio de masa de aire entre el interior y el exterior del edificio llevan consigo un intercambio energético cuando el aire interior y exterior se encuentra a diferente temperatura o humedad.

El flujo de calor sensible debido al intercambio de masa de aire, se expresa según la siguiente relación:

$$q_s = Qrc_p \Delta T \quad (2.2.39)$$

donde q_s es el flujo de calor sensible, Q el radio de intercambio de masa de aire, r la densidad del aire, c_p el calor específico del aire, ΔT la diferencia de temperatura interior exterior ($^{\circ}C$).

El flujo de calor latente causado por el intercambio de masa de aire, se expresa como sigue:

$$q_l = Qrh_{fg} \Delta H \quad (2.2.40)$$

donde q_l es el flujo de calor latente, h_{fg} es el calor latente del vapor a temperatura de aire apropiada (aproximadamente 2.34×10^6), ΔH la diferencia de humedad (masa de agua/unidad de masa de aire seco) del aire interior exterior.

Por otro lado, el flujo másico de aire a través del cerramiento puede aumentar la conductividad térmica del cerramiento, aunque este efecto es difícil de cuantificar.

En diversas aplicaciones de análisis energéticos de edificios, el flujo de calor latente y la disminución de la resistencia del cerramiento pueden ser consideradas despreciables.

El flujo de masa de aire a través de la envolvente es debido a la diferencia de presión del gas interior y exterior en las aberturas y grietas, cuyas características (localización, dimensiones, etc.) determinan la dependencia de dicho flujo con la diferencia de presión.

En el caso de edificios, los fenómenos de intercambio de masa de aire pueden diferenciarse en: infiltración y ventilación. Se denomina infiltración al inevitable flujo de masa producido a través de grietas de la envolvente. Se denomina ventilación al flujo de masa producidos de forma intencionada mediante aberturas en la envolvente (ventilación natural) o sistemas mecánicos de movimiento de aire (ventilación forzada o mecánica).

La desigualdad de presión del aire en el interior y el exterior en un lugar determinado de la envolvente presenta las siguientes causas:

- Viento exterior.
- Distinta densidad de aire debida a la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior (efecto de estratificación).
- Operación de aparatos de ventilación mecánica, etc.

En general, la diferencia entre la densidad del aire interior y exterior puede ser despreciada, por lo que el flujo volumétrico entrante debe igualar al saliente; lo cual afecta la distribución sobre la envolvente, de las diferencias de presión de aire interior-exterior en las grietas y aberturas.

Cuando el viento incide sobre la envolvente produce una distribución de presión estática sobre la superficie exterior que depende de la dirección y velocidad del viento, densidad del aire, orientación de la superficie y las condiciones de su entorno. Cuando la envolvente no presenta aberturas significativas, esta distribución de presión es independiente de la presión en el interior del edificio. Si no actúan otras causas que provoquen diferencia de presión, no existen diferencias de temperatura interior-exterior y no se aplican sistemas mecánicos, la diferencia de presión se puede expresar como sigue:

$$\Delta P = P_0 + P_w - P_i \quad (2.2.41)$$

donde: ΔP es la diferencia de presión interior-exterior en una determinada posición, P_0 es la presión estática a la altura de referencia en flujo no perturbado, P_w es la presión debida al viento en la posición determinada, P_i es la presión interior a la altura de la posición determinada.

Si no existe diferencia de temperatura interior-exterior, la presión estática interior decrece linealmente con la altura a una velocidad que depende de la

temperatura interior. La velocidad de disminución de la presión resulta igual a $-r_i g$, donde r_i es la densidad de aire media interior y g es la constante de aceleración debida a la gravedad. La presión estática interior alcanza el equilibrio en un valor tal que el flujo de aire total entrante debe ser igual al flujo de aire total saliente del edificio. La presión estática interior se podría determinar calculando los flujos a través de cada grieta como una función de la presión interior e igualando a cero la suma de todos estos flujos de aire. Sin embargo, para resolver la presión interior de este modo, es necesario conocer la posición de cada abertura o grieta en la envolvente, el valor de p_w en esta posición y la relación entre el flujo de aire y la diferencia de presión en cada una.

Cuando existe una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio, aparece un gradiente ΔP_s en la diferencia de presión, que es función de la altura y de la diferencia de temperatura y puede ser sumada a la diferencia de presión debida al viento, de forma que aplica la siguiente relación:

$$\Delta P = P_0 + P_w - P_{ir} + \Delta P_s \quad (2.2.42)$$

donde: P_{ri} es la presión estática interior a una altura de referencia, en la que de nuevo se asume un valor tal que el flujo de aire entrante y saliente son iguales. La suma de todos los flujos de aire a través de estas aberturas puede ser igualada a cero y resuelta para la presión interior a la altura de referencia.

En el caso de que opere un sistema mecánico, como un ventilador, etc., se impone un flujo de aire adicional. La diferencia de presión puede ser todavía calculada utilizando la ecuación previa 2.2.42, pero la presión de referencia interior P_{ri} varía de forma que se mantiene el balance entre el flujo de aire entrante y saliente.

De modo que la diferencia de presión a través de la envolvente y el correspondiente flujo de aire, depende de la distribución de presión debida al viento, la posición de las grietas y aberturas y la relación entre la diferencia de presión y del flujo de aire a través de cada abertura. Sin embargo, la recopilación de esta información es difícil y a menudo inviable en un edificio.

Diferencia de presión debida al viento

La presión debida al viento es generalmente positiva respecto a la presión estática cuando el flujo de aire es no turbulento en la cara de la envolvente que enfrenta al viento y negativa en la cara opuesta, siendo las presiones en el resto de caras positivas o negativas dependiendo del ángulo de incidencia del viento y de la forma del edificio. La presión debida al viento queda descrita por la ecuación de Bernoulli, asumiendo que no varía la altura ni se dan pérdidas de presión:

$$\Delta P_w = C_p \rho \frac{n^2}{2} \quad (2.2.43)$$

donde: P_w es la presión debida al viento en la superficie relativa a la presión estática con flujo no turbulento, r es la densidad de aire, c_p es el coeficiente de presión de la superficie debida al viento que depende de la localización, geometría del edificio y de la dirección del viento (siendo adimensional).

Se debe resaltar que la velocidad y dirección del viento que incide en un edificio es normalmente diferente (típicamente su velocidad resulta menor) a aquella que se ha podido medir en estaciones meteorológicas cercanas. Esto es debido principalmente a la variación que se origina por la presencia del terreno y los obstáculos.

Swami y Chandra (1988) elaboraron una base de datos de 544 coeficientes medios de presión en superficie, para ocho edificios bajos y uno alto, la cual fue utilizada para desarrollar una relación empírica entre dicho coeficiente y el ángulo de incidencia del viento y la geometría del edificio, siendo dicha relación:

$$C_p = \ln(1.248 - 0.703 * \sin(\frac{a}{2}) - 1.175 * (\sin(\frac{a}{2}))^2 + 0.131 * (\sin(2aX))^{-3} + 0.769 * \cos(\frac{a}{2}) + 0.07 * X^2 * (\sin(\frac{a}{2}))^2 + 0.717 * (\cos(\frac{a}{2}))^2) \quad (2.2.44)$$

donde: C_{pn} es C_p normalizada, α es el ángulo entre la dirección de viento y la normal al muro considerado, X es el cociente entre la anchura del muro considerado y la anchura del muro adyacente.

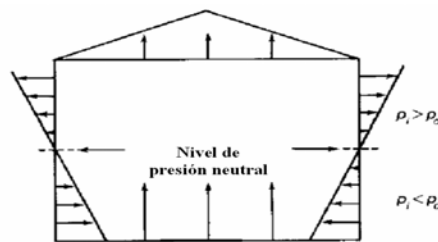
Swami y Chandra (1988) también observan que las incertidumbres en la estimación de la velocidad del viento sobre el edificio y el efecto de edificios adyacentes, es probablemente igual o mayor que la incertidumbre en la estimación de C_p mediante la ecuación 2.2.44.

Aunque las diferencias de presión que se producen en las superficies varían rápidamente a causa de fluctuaciones turbulentas del viento; normalmente calcular las diferencias de presión mediante valores medios de la presión del viento es suficiente para estimar los valores de infiltración medios (Grimsrud y col. 1975; Etheridge y Notan, 1979).

Diferencia de presión debida al efecto de estratificación

La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior causa diferencia de densidad y por lo tanto diferencia de presión que provoca infiltración. Durante periodos de calefacción, el aire caliente en el interior se eleva y se producen flujos de masa de aire salientes a través de las aberturas y grietas en las zonas elevadas de la envolvente, y flujos de aire entrantes a través de aquellas en las zonas bajas. Durante los periodos de refrigeración la dirección del flujo se invierte. La distribución de presión debida al efecto de estratificación presenta la

forma cualitativa que se presenta en la figura 2.4., la altura a la que la presión interior y exterior son iguales se denomina nivel de presión neutral (Tamura y Wilson, 1966, 1967a), por encima de este punto la presión interior es mayor que la presión exterior y por debajo de este punto la primera es menor que la segunda.



→: Magnitud y dirección de la diferencia de presión

Fig.2.4. Diferencia de presión causada por el efecto de estratificación, sin viento, para una estructura típica, en periodo de calefacción. (Tamura y Wilson, 1966)

La diferencia de presión debida al efecto de estratificación a la altura Z se expresa mediante la siguiente relación:

$$\Delta P_s = (r_e - r_i)g_c(Z - Z_{NPL}) = r_i g_c (Z - Z_{NPL}) \frac{(T_i - T_e)}{T_e} \quad (2.2.45)$$

donde: ΔP_s es la diferencia de presión debido al efecto de estratificación, r_i y r_e son la densidad de aire interior y exterior, g_c es la constante

gravitacional, Z la altura en el punto de observación y Z_{NPL} la altura en el nivel neutral, T_i y T_e las temperaturas de aire interior y exterior.

Chastain y Colliver (1989) demostraron que la diferencia de temperatura promedio de la distribución vertical de temperaturas ($T_i - T_e$) debido a la estratificación, es la diferencia de temperaturas apropiada en la ecuación previa 2.2.45, en vez de la diferencia de temperatura localizada en cada abertura.

La posición del nivel de presión neutral a velocidad de viento nula, es un parámetro que depende exclusivamente de la estructura del edificio, en particular de la distribución vertical de aberturas en la envolvente, la resistencia de cada abertura al flujo de aire y la resistencia a flujos de aire vertical en el interior del edificio. En el caso de que las aberturas estuvieran simétricamente distribuidas y presentaran la misma resistencia al flujo de aire y no se presenta resistencia al flujo de aire interior, el nivel de presión neutral estaría localizado en el medio del edificio. Si existiera una única abertura o una abertura de tamaño mucho mayor que el del resto, el nivel de presión neutral se situaría en el centro de esta abertura. Numerosos trabajos estudian analítica y experimentalmente la localización de este nivel en diversas estructuras de edificios (Foster y Downs, 1987; Lee y col., 1985; Lee y col. 1988; Tamura y Wilson, 1966; Tamura y Wilson, 1967^a; Shaw y Brown, 18982; etc.).

Diferencia de presión debida a una combinación de causas

Cuando existen diferencias de presión debidas a la presión del viento, presión de estratificación y sistemas mecánicos, la diferencia de presión total es la suma de todas ellas.

Flujo de aire a través de aberturas

La relación entre el flujo de masa de aire a través de una abertura y la diferencia de presión en esta, se denomina función de filtración de la abertura, y depende de la geometría de esta. Los fundamentos teóricos en los que se basa la función de infiltración quedan descritos en varias referencias (Hopkins y Hasford 1974; Etheridge, 1977; Kronvall, 1980^a; Chastain y col., 1987).

La relación que describe el flujo de aire a través de una abertura se basa en la ecuación de Bernoulli para flujo estacionario e incompresible. La expresión más habitualmente utilizada se presenta a continuación:

$$Q = C_D A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.2.46)$$

donde: Q es el flujo de aire, C_D el coeficiente de descarga para la abertura, A el área de la abertura perpendicular a la sección, ρ la densidad del

aire, ΔP la diferencia de presión a través de la abertura. C_D depende de la geometría de la abertura y el número de Reynolds del flujo de aire (ver ecuación 2.2.25).

El flujo de aire a través de conductos de área constante esta bien caracterizada. Para número de Reynolds suficientemente bajos y flujos totalmente desarrollados, la velocidad del fluido varia solo en la dirección perpendicular al flujo, denominándose el flujo como laminar, en este caso C_D es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión, de forma que Q es proporcional a ΔP . Para número de Reynolds elevados, el flujo se convierte en turbulento y la velocidad en un punto determinado fluctúa rápida y aleatoriamente, incluso si la velocidad de flujo temporalmente promediada es constante, en flujo turbulento C_D es constante para un determinado número de Reynolds, de forma que Q es proporcional a $\sqrt{\Delta P}$.

La discusión precedente sobre flujo laminar y turbulento se aplica a conductos de área constante con flujos totalmente desarrollados. Las aberturas en la envolvente del edificio presentan una geometría mucho menos uniforme, por otro lado generalmente el flujo nunca llega a ser totalmente desarrollado, por lo que la relación entre Q y ΔP resulta más compleja. Para cada abertura de la envolvente la ecuación 2.2.46 sigue siendo valida, en esta relación A es el área de la grieta del cerramiento constructivo, C_D depende de la geometría y la diferencia de presión a lo largo de la grieta. La siguiente ecuación, comúnmente denominada “Ecuación de ley de potencia”, es a menudo utilizada:

$$Q = c(\Delta P)^n \quad (2.2.47)$$

donde: Q es el flujo volumétrico de intercambio de masa de aire entre el interior y el exterior, c es el coeficiente de flujo y n es el exponente de flujo.

La ley de potencia solo aproxima la relación entre Q y ΔP , de hecho el valor de c y n depende del rango ΔP sobre el que se aplica la ecuación y no tiene interpretación física. Honma (1975) analizó experimentalmente Q en función de ΔP para varias aberturas sencillas, introduciendo los valores en la ley de potencia observo que, las grietas con mayor resistencia al flujo (es decir, grietas más estrechas o canales más largos) tendían a presentar un exponente mas próximo a 1 que aquellas con menos resistencia.

Clarke (1985) presenta la siguiente relación para el flujo de aire a través de grietas, para el rango de ΔP típico en el caso de edificios en intemperie:

$$n = 0.5 + 0.5e^{(-W/2)} \quad (2.2.48)$$

$$c = Kl \quad (2.2.49)$$

$$K = 0.0097(0.0092) \quad (2.2.50)$$

Siendo W la anchura de grieta y l la longitud de grieta.

Resultando n próximo a 1 para grietas con alta resistencia y próximo a 0.5 para aquellas con menos resistencia al flujo de aire, dependiendo del carácter del flujo.

Modelos de flujo de aire en edificios.

Varios modelos del flujo de aire en edificios han sido desarrollados, basados en modelos físicos de edificios monozona sin resistencia interna al flujo de aire (Cole y col., 1980; Warren y Webb, 1980; Sherman y Grimsrud, 1980). El modelo de Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) (Sherman y Grimsrud, 1980) ha sido ampliamente utilizado, este es un modelo empírico basado en datos experimentales de edificios específicos, permite predecir valores de infiltración medios para periodos de al menos una semana, si bien esta sujeto a un elevado grado de incertidumbre cuando se aplica a edificios diferentes a los utilizados para desarrollar el modelo:

$$Q = \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s \Delta T + C_v v^2} \quad (2.2.51)$$

donde: Q es el flujo másico de infiltración, A_L es el área efectiva de grieta del que (ASHRAE, 1988) presenta valores tabulados típicos para los diferentes tipos de grietas y aberturas de edificios (juntas de ventana, respiraderos, enchufes, etc.), C_s es el coeficiente de estratificación del que (ASHRAE Fundamentals, 1987) presenta valores tabulados típicos que son función de la

resistencia interior del edificio al flujo de aire (número de pisos), ΔT es la diferencia de temperatura interior-exterior media para el intervalo de tiempo de calculo, C_v es el coeficiente relativo al viento del que (ASHRAE, 1988) presenta valores tabulados típicos que son función de las dimensiones del edificio (número de pisos) y de la cantidad de los obstáculos al viento en los alrededores, v es el valor medio de la velocidad del viento medida en una estación meteorológica local para el intervalo de tiempo utilizado en el cálculo.

La precisión de este modelo según ASHRAE Fundamentals (1999) puede ser muy buena (7% para periodos semanales, 30% para periodos mas cortos) cuando los parámetros son bien conocidos para el edificio en cuestión, pero esta disminuye cuando los parámetros no son bien conocidos (Sherman y Modera, 1986). Todos estos modelos de una zona son sensibles a la información de entrada que es comúnmente difícil de determinar. Estos modelos presentan errores medios del orden de 40% para muchas medidas en grupos de casas y pueden ser del orden del 100% en casos particulares (Persily, 1986).

Es muy común utilizar el termino ‘intercambios de aire’ que relaciona el flujo másico con el volumen de aire de la zona (V), $l = Q/V$. Cabe señalar que en algunos casos pueden producirse intercambios de masa líquida a través de la envolvente, sin embargo incluso en estos casos, el intercambio energético asociado puede considerarse despreciable en la mayoría de aplicaciones).

2.6. Principales parámetros que caracterizan térmicamente la envolvente de un edificio.

Las relaciones que describen los procesos de transferencia de calor definen e identifican los parámetros que caracterizan térmicamente los cerramientos constructivos.

Cuando se adopta una descripción detallada de los fenómenos de intercambio energético en la envolvente de un edificio, son necesarios todos los parámetros que describen cada uno de los mecanismos descritos en la sección 2.5., estos parámetros son los siguientes:

- Emitancia de cada una de las superficies.
- Absortancia de cada material
- Transmitancia de cada material.
- Factor de forma de cada superficie del cerramiento respecto a cada uno de los objetos de su entorno.
- La capacidad calorífica de cada material, que está descrita por su calor específico y por su densidad.
- Conductividad térmica de cada una de las capas que forman los cerramientos.
- Dimensiones (espesor y área) de las capas que los componen.
- El coeficiente de transferencia de calor por convección a través del área A de la superficie h_{conv} , la cual no es una característica del material y depende

de la composición del fluido, de la geometría de la superficie del sólido y de la hidrodinámica del movimiento del fluido a lo largo de la superficie; en particular es función de los siguientes parámetros y variables característicos de la configuración: conductividad térmica del fluido k , velocidad del fluido en corriente libre U_{∞} , densidad del fluido ρ , viscosidad del fluido $\Delta P m$, calor específico a presión constante c_p , coeficiente de dilatación del fluido β ($1/T_{\infty}$ para un gas ideal), diferencia de temperatura entre la superficie y la corriente libre, longitud de la superficie L .

- La posición y dimensiones de grietas y aberturas en la envolvente constructiva. Alternativamente para una descripción aproximada se podrían utilizar parámetros empíricos que promedian las características del edificio en su conjunto respecto a su resistencia al flujo de aire interior-exterior debido al viento, estratificación o sistemas mecánicos, por ejemplo para el modelo de LBNL: área efectiva de grieta, el coeficiente de estratificación, el coeficiente relativo al viento, de los que se presentan valores empíricos promedios tabulados en función de las dimensiones de la envolvente (número de pisos; etc.) y características de grietas típicas (juntas de ventana, respiraderos, enchufes, etc.).

Normalmente es posible aplicar algunas simplificaciones que permiten caracterizar la mayoría de las envolventes constructivas a partir de un número reducido de parámetros. Las simplificaciones y los parámetros térmicos característicos habitualmente utilizados se presentan a continuación:

- Transmitancia térmica o coeficiente de transmisión de calor, U .

- Transmitancia solar o coeficiente de ganancia solar, g.

Transmitancia térmica, U.

Cuando existe una diferencia de temperatura ΔT (conocida) entre dos medios cualesquiera, en muchos casos resulta útil simplificar las expresiones de la transferencia de calor combinando las resistencias o conductancias individuales del sistema térmico en una cantidad U llamada conductancia total unitaria, tal que:

$$q = UA\Delta T \quad (2.2.52)$$

UA es el coeficiente de transmisión de calor y se define como el flujo de calor, en estado estacionario, dividido por la diferencia de temperatura del aire a ambos lados del componente, para el caso de cerramientos constructivos. Se expresa habitualmente en W/K.

De forma que esta simplificación permite estimar la transferencia de calor en función de las temperaturas de ambos medios.

En el caso de cerramientos, U puede expresarse mediante las resistencias térmicas individuales debidas a los fenómenos de conducción, convección o radiación como sigue:

$$U = \frac{1}{A \sum R_i} \quad (2.2.53)$$

Como se ha expuesto anteriormente cada R_i representa la resistencia correspondiente a fenómenos de convección, conducción o radiación o combinaciones de ellos en serie o en paralelo que se dan en el sistema térmico; por lo que según esta definición el parámetro U engloba los fenómenos de convección, radiación y conducción.

Según se presentan en los puntos 2.2.1 y 2.2.3, es posible definir los coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección, empleando las simplificaciones presentadas en los citados puntos. Si bien se debe tener siempre presente el significado de estas resistencias térmicas. En particular el citado coeficiente de radiación depende de la temperatura del medio, factores de forma y emitancias del sistema y el entorno (como se presenta en el apartado 2.2.1); el coeficiente de convección depende de dimensiones del sistema, propiedades termofísicas del fluido, propiedades del flujo de masa, temperaturas del fluido y sistema, entre otros (como se presenta en el apartado 2.2.3). Sin embargo en el caso de cerramientos constructivos, la contribución de estos coeficientes en el denominador de la ecuación 2.2.51 es en muchos casos muy pequeña, lo cual permite asumir valores constantes aunque aproximados para los mismos.

Por ello, es muy habitual considerar U como una característica con valor constante para cada cerramiento.

Una simplificación muy habitual en normas sobre condiciones térmicas de edificios es combinar los efectos de convección y radiación en una única resistencia térmica superficial y asumir un valor constante para las resistencias superficiales interna y externa.

La transferencia de calor debida a los fenómenos de ventilación e infiltración en edificios (despreciando el calor latente y la posible variación de la conductancia del cerramiento) cumplen la ecuación 2.2.39: $q_s = Qrc_p \Delta T$; es muy habitual denominar UA_{inf} según se presenta en la siguiente relación:

$$UA_{inf} = Qrc_p \quad (2.2.54)$$

Como se presentó en el apartado 2.2.4, esta variable depende de la posición y dimensiones de grietas y aberturas en la envolvente del edificio; la velocidad y dirección de viento y la diferencia de temperaturas interior-exterior. Sin embargo cabe señalar que en algunas ocasiones es posible aproximar su valor por una constante obteniendo resultados aceptables en función de los objetivos particulares del análisis.

Por otro lado, otros trabajos combinan el coeficiente de transmisión de calor UA debido a conducción, convección, radiación, infiltración y ventilación en un término único.

Transmitancia solar o coeficiente de ganancia solar, g .

Como se describe en el apartado 2.2.1, cuando la irradiancia solar incide en un componente, parte de la radiación es transmitida, parte absorbida y parte reflejada. La radiación absorbida se transforma en calor en el material absorbente, lo cual produce un aumento de su temperatura hasta un estado de equilibrio en el cual se disipa por conducción, convección y radiación. De forma que parte de esta energía será transferida hacia el exterior del edificio y el resto hacia el interior.

Se define como coeficiente de ganancia de calor solar, g , a la fracción de la irradiancia solar incidente que atraviesa la envolvente del edificio y se transforma en energía calorífica.

gA es la transmitancia solar total o la apertura solar y se define como el flujo térmico que abandona la superficie interna de la envolvente en estado estacionario, y se debe a la intensidad de irradiancia solar incidente en la envolvente. Se expresa habitualmente en m^2 .

De forma que el flujo de calor hacia el interior del edificio (q) debido a la irradiancia solar incidente (G), para el estado estacionario, cumple la siguiente relación:

$$q = gAG \quad (2.2.55)$$

Para cristales simples, se presenta la siguiente relación:

$$g = t + a \frac{U}{h_e} \quad (2.2.56)$$

En elementos de cerramientos opacos, se cumple la siguiente expresión:

$$g = a \left(\frac{U}{h_e} \right) \left(\frac{A_n}{A} \right) \quad (2.2.57)$$

Donde h_e es el coeficiente superficial exterior de transferencia de calor, A es el área de la superficie expuesta al exterior y A_n su proyección normal.

Las propiedades ópticas, a y t , dependen del ángulo de incidencia de la irradiancia, por lo que el coeficiente de ganancia solar también es función de este ángulo de incidencia. Sin embargo, para muchos cristales el coeficiente de ganancia solar es relativamente constante aproximadamente entre 0 y 50° (ASHRAE Fundamentals, 1997). Tan bien, las propiedades ópticas, a y t , dependen de la distribución espectral de la irradiancia, de modo que el coeficiente de ganancia solar también presenta esta dependencia. No obstante muchos vidrios empleados en ventanas no presentan una fuerte selectividad espectral en el espectro solar, por lo que sus propiedades ópticas espectrales pueden considerarse constantes, incluso si el espectro de la fuente presenta variaciones relevantes.

Aunque g es el símbolo más usual en la bibliografía para este parámetro, también se emplean otras nomenclaturas en algunas referencias, como F en (Código Técnico de la Edificación) o SHGC en (ASHRAE Fundamentals, 1997).

Ecuaciones de balance energético.

En un edificio por tanto se presentan los siguientes fenómenos de transferencia de calor en sus diferentes elementos:

- Conducción a través de los muros y superficies acristaladas exteriores.
- Conducción a través del suelo.
- Convección externa entre las superficies exteriores y el aire exterior.
- Convección interna entre las superficies interiores, como son los cerramientos, mobiliario, ocupantes, etc. y el aire interior.
- Radiación de onda corta procedente principalmente del Sol y de fuentes internas (también de bombillas etc.).
- Radiación exterior de longitud de onda larga, emisión IR, entre las paredes exteriores y la bóveda del cielo, los edificios circundantes y el suelo.
- Radiación interior de longitud de onda larga entre las diversas superficies interiores en función de las temperaturas.
- Procesos de intercambio de masa entre el entorno y el interior del edificio así como entre zonas.

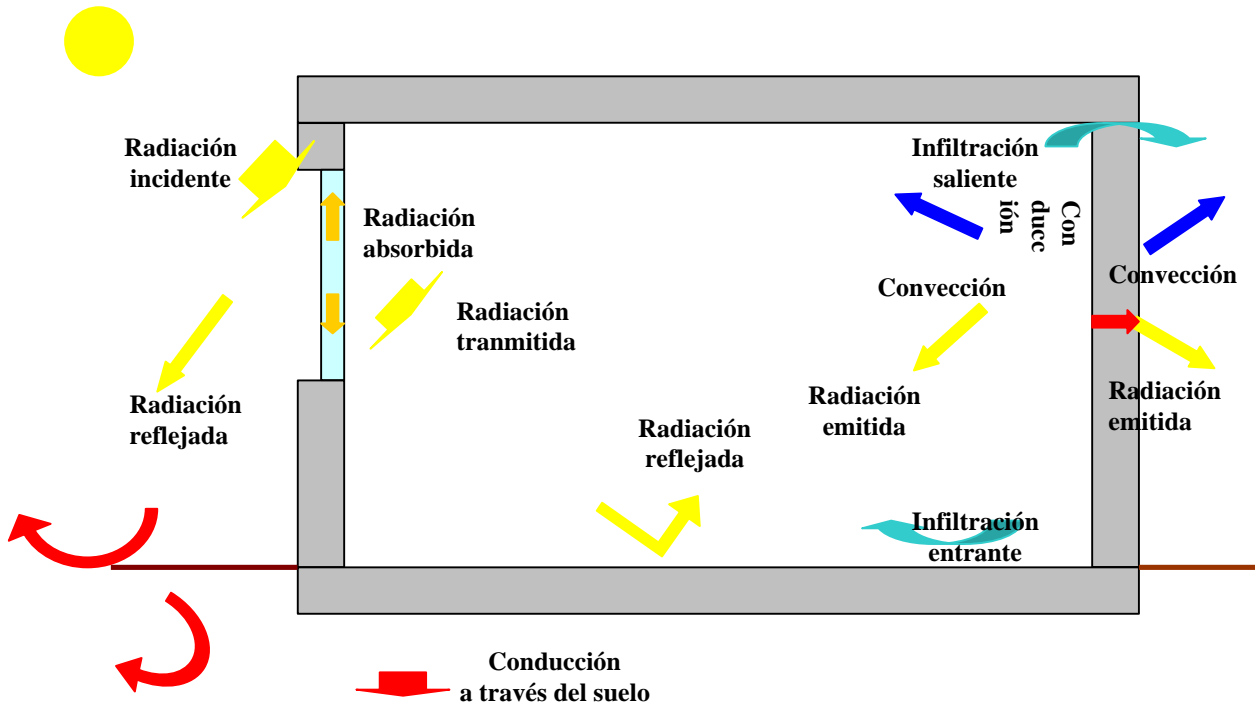


Fig.2.5. Esquema de flujos de energía en un edificio unizona. (Imagen del autor)

De acuerdo con la primera ley de la conservación de la energía, se establecen las siguientes ecuaciones de balance energético¹, en las que queda

¹ Como se describe previamente la envolvente del edificio esta compuesta por diferentes componentes que constituyen sistemas térmicos diferentes, muros, ventanas, suelo, componentes solares pasivos (muros trombe, chimeneas solares) etc.; en los que se producen los fenómenos de transferencia de calor recogidos previamente que se rigen por las leyes básicas y relaciones expresadas en los apartados previos. Cabe señalar que existen componentes de edificios, como componentes solares pasivos por ejemplo chimenea solares o muros trombe, que constituyen sistemas térmicos complejos, que en muchos casos están siendo objeto de estudio y análisis en la actualidad, y para los que se han planteado y desarrollado modelos teóricos y empíricos que describen los flujos de energía y masa a través de ellos, cuya descripción teórica esta fuera del alcance de esta investigación.

implícito las hipótesis normalmente asumidas en los flujos térmicos en edificios presentadas en los puntos precedentes.

Ecuación de difusión

La ecuación del balance energético en un elemento de volumen de un cuerpo sólido en el que se transfiere el calor solo por conducción, se obtiene al establecer el equilibrio energético en este elemento entre el calor que entra, el que sale, el almacenado y el generado en él, según la ley de conservación de la energía. Las fuentes internas generadoras de energía pueden deberse a una reacción química nuclear, a disipación eléctrica, etc., pueden estar concentradas en ciertos puntos o distribuidas a través del sólido.

Respecto a las relaciones que representan el calor almacenado, uno de los modelos más elementales para la transferencia de calor no estacionario de un cuerpo cuando se lleva a cabo a volumen constante con temperatura uniforme y no existe generación de energía dentro del material, describe la variación de temperatura como (ASHRAE Fundamentals, 1997):

$$\mathbf{j}_{net} = \mathbf{rc}_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2.58)$$

donde: ρ es la densidad del cuerpo y c_v su calor específico a volumen constante. \dot{q}_{net} es la diferencia entre el flujo de calor entrante y saliente, siendo positivo si es entrante y negativo si es saliente. Si el proceso se lleva a cabo a presión constante, c_v debe reemplazarse por c_p , aunque para líquidos y sólidos c_v y c_p son muy próximos, por lo que habitualmente es posible utilizar c_p . Más detalles sobre este fenómeno están descritos en (Kreith y Bohn, 2002) y (ASHRAE Fundamentals, 1997).

Respecto al flujo de calor por conducción, si se desarrolla en serie de Taylor el flujo saliente en función del flujo entrante, se desprecian los términos de segundo orden y mayores en este desarrollo y se considera la ley de Fourier (ecuación 2.2.17), se obtiene la ecuación que representa el equilibrio ‘volumétrico’ que debe existir en cada punto del cuerpo:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_G \quad (2.2.59)$$

donde: k es la conductividad térmica, ρ la densidad, y c_p el calor específico y definiendo como difusividad térmica α , el cociente $k/\rho c_p$, q_G es la generación de energía en el elemento de volumen del cuerpo.

De este modo:

- El término de la izquierda de la ecuación representa la variación de energía interna del cuerpo por unidad de volumen.
- El primer término de la derecha representa la densidad de flujo de conducción de calor en el elemento de volumen por unidad de volumen.
- El segundo término de la derecha representa la generación de energía en el cuerpo por la unidad de volumen.

Condición de contorno en cada superficie.

Se puede expresar en la forma:

$$\left(-I \frac{\partial T}{\partial x}\right)_j = h_{conv}(T_{sj} - T_i) + J_j - G_j \quad (2.2.60)$$

donde: I es la conductividad térmica, h_{conv} el coeficiente de convección, T_{sj} la temperatura interior de la superficie j , T_i la temperatura del aire interior, s la constante de Steffan-Boltzman, J_i y G_j la radiosidad e irradiancia en la superficie j .

En función de los objetivos de este trabajo, J_i puede ser expresado como sigue, en particular en una superficie opaca difusa y gris en la que se cumple $r = 1 - e$:

$$J_j = \mathbf{se}_j T_j^4 + (1 - \mathbf{e}_j) G_j \quad (2.2.61)$$

La irradiancia sobre la superficie puede ser expresada como:

$$G_j = \sum_{k=1}^n F_{jk} \mathbf{e}_k \mathbf{s} T_{sk}^4 + \mathbf{j}_r \quad (2.2.62)$$

F_{jk} los factores de forma entre la superficie j y k, T_{sk} la temperatura de la superficie k siendo k cada una de las superficies del entorno, \mathbf{j}_r la irradiancia sobre la superficie proveniente de radiación solar transmitida al interior, radiación de fuentes internas (no incluida en el termino anterior en función de su temperatura absoluta) tanto directa como reflejada en otras superficies del entorno.

Según lo cual,

El primer miembro de esta ecuación 2.2.60 representa:

- El flujo de conducción en la superficie

En el segundo miembro de la ecuación 2.2.60 los términos indicados representan los siguientes fenómenos de transmisión energética:

- Primero: flujo convectivo entre dicha superficie y el aire;

- Segundo: radiosidad de la superficie.
- Tercero: irradiancia sobre la superficie.

Balance sobre el aire interior.

La variación de energía interna del aire del recinto viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{r}VC_p \frac{dT_i}{dt} = \sum_j A_j h_{convj} (T_{sj} - T_i) + Q\mathbf{r}c_p (T_e - T_i) + q_{aux} \quad (2.2.63)$$

donde: \mathbf{r} es la densidad del aire, V el volumen de aire de la zona, c_p el calor específico del aire, T_i la temperatura del aire interior, A_j el área de la superficie j , h_{convj} coeficiente de convección en la superficie j , Q el flujo volumétrico de masa aire, T_e la temperatura exterior del aire, q_{aux} el flujo de convección originada por fuentes internas.

En la expresión previa se considera que el coeficiente de absortividad del aire es nulo.

De este modo:

El primer miembro de esta ecuación representa:

- Variación de energía interna del aire interior.

Los términos indicados del segundo miembro representan los siguientes fenómenos de transferencia energética:

- Primero: suma de flujos de calor por convección.
- Segundo: flujo de energía debido a los fenómenos de infiltración y ventilación.
- Tercero: flujo de calor debido a la convección originada por la existencia de fuentes de calor internas.

En función de las simplificaciones asumidas para describir los parámetros UA y gA en el apartado 2.2.5, es posible expresar la ecuación de balance energético sobre el aire interior como sigue:

$$rVC_p \frac{dT_i}{dt} = UA(T_e - T_i) + Qrc_p(T_e - T_i) + q_t + gAG + q_{aux} \quad (2.2.64)$$

De este modo los términos indicados del segundo miembro representan los siguientes fenómenos de transferencia energética:

- Primero: flujo de energía aire-aire entre el exterior e interior.
- Segundo: flujo de energía debido a los procesos de infiltración y ventilación. Como se indica previamente a menudo se utiliza el término $UA_{inf} = Qrc_p$. También habitualmente se utiliza el parámetro $m = Qr$, denominándose m como el flujo másico de aire, normalmente es posible medir valores del flujo

másico de infiltración medios, no siendo una practica habitual ni simple su medida dinámica.

- Tercero: flujo de calor a través del suelo.
- Cuarto: flujo de calor que abandona la superficie interna de la envolvente debida a la irradiancia solar.
- Quinto: flujo de energía auxiliar suministrada.

3. La Fachada Ventilada.

3.1. Introducción.

El cerramiento vertical o fachada es la parte más importante y más crítica del sistema de construcción de un edificio. Esta complejidad funcional, reforzada por la gran disponibilidad de materiales, técnicas y tecnologías que hoy existen en el mercado y reforzada por los objetivos de sostenibilidad, con los que debe cumplir ahora el amplio mundo de la construcción, agrava el proyecto de nuevas responsabilidades.

El proyecto de construcción en su fase de ejecución, requiere hoy en día una nueva cultura técnica capaz de combinar los objetivos generales con los del específico clima que lo solicita. En otras palabras, se pone de relieve la necesidad de un diseño que es función del contexto ambiental en el que se implanta.

Es necesario en este sentido, un conocimiento profundo de los materiales y su capacidad de reacción a los agentes ambientales, de las disciplinas relacionadas con la física de la construcción, de las patologías de los sistemas de construcción, de los procesos de mantenimiento, de los efectos energéticos en la construcción y de las cuestiones relacionadas con la sostenibilidad y el medio ambiente.

En esta óptica, se intenta hacer un análisis de la metodología y tecnologías de diseño para transformar el cerramiento de un edificio de sistema pasivo a los estímulos externos, en un sistema activo que, a través de su interacción con los equipos de tratamiento del aire, sea capaz de

cambiar su comportamiento o su función con los fenómenos climáticos estacionales.

En este capítulo se hace una reseña de los sistemas de fachadas que trabajan directamente en la definición de la mayoría de las prestaciones conforme a las necesidades de las paredes exteriores.

En las páginas que siguen se procederá a analizar el producto "fachada ventilada" (Figura 3.1.), reconstruir su evolución y determinar sus puntos críticos para definir un marco de prestaciones lo más completo posible.

De este análisis se constató la ausencia de criterios para determinar el funcionamiento real de la fachada ventilada, es decir la posibilidad que se genere el efecto chimenea en verano y la funcionalidad de invierno del espacio tampón (cámara *buffer*) para mejorar el rendimiento del aislamiento térmico.

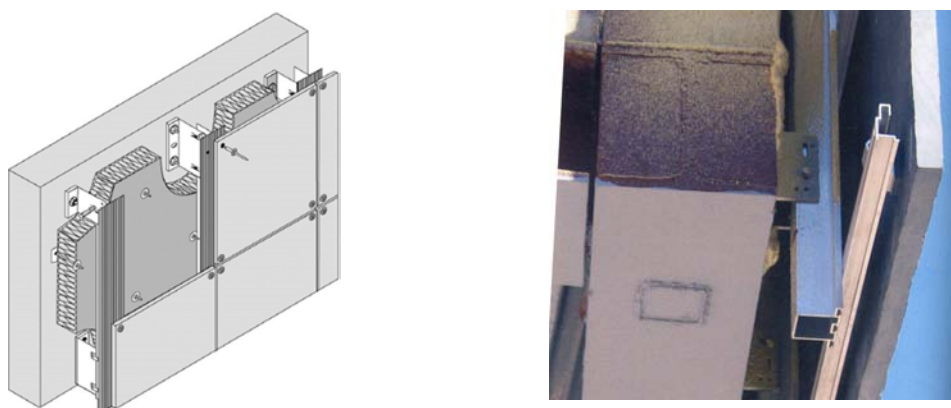


Fig.3.1. Fachada ventilada. (La fachada ventilada y ligera, Cristina Pardal / Ignacio Paricio)

Aunque poco a poco (o mejor dicho, según los tiempos en que el sector de la construcción "metaboliza" el progreso de la investigación), el proceso de "traducción" de las antiguas técnicas de construcción de las fachadas ventiladas de ladrillo ha conseguido, a través de la ampliación de los horizontes expresivos prestacionales, establecer una nueva relación entre la imaginación tecnológica y la memoria cultural.

De hecho, la historia demuestra que muchas veces se recurre a las formas codificadas de un lenguaje ya conocido para superar la difícil transición hacia una nueva era. "En este caso, la imitación (la mimesis latina) es el medio utilizado para colmar la diferencia que existe siempre entre la innovación tecnológica y la adaptación cultural"¹.

La situación general que se describe al principio no niega el interés de las soluciones que empiezan a difundirse entre los arquitectos y constructores más inquietos, dos mundos muy distintos que conviven en el sector. Uno está implicado en el desarrollo de nuevas tecnologías, su estudio teórico, impulsión y experimentación, con el riesgo que ello conlleva, y el otro, al margen del progreso, es completamente conservador y estancado en el hacer cotidiano, y adopta una actitud reacia a cualquier cambio.

Sigue siendo cierta una afirmación de Hutcheon, tal como la redactó hace más de cincuenta años: "*el estado del conocimiento en la actualidad parece cada vez menos adecuado a los incrementos de calidad exigidos por la demanda*".

¹ (Andrea Campioli, "Miméis versus tecnomorfismo: un'interpretazione del gesto architettonico", in Guido Narni, Andrea Campioli, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica. Tecniche esecutive e cultura del costruire*, edizione Franco Angeli, Milano, 1994, pg.50).

Medio siglo después Sergio Croce insiste: *”la fiabilidad de los actuales sistemas constructivos tiende a reducirse cada vez más respecto al pasado en la medida en que el sistema mismo tiende a ser más complejo, a causa de la heterogeneidad de los materiales utilizados y de la mayor exigencia de prestaciones”*.

Pero el sector de la construcción es muy amplio. Si por un extremo se sofisticaba hasta la exasperación, por el otro se mantiene en las prácticas más justificadas y asistemáticas. Lo cierto es que gran parte de lo que se construye podría agruparse dentro de una “construcción rupestre”, una construcción empecinada en yuxtaponer los materiales más diversos rehuendo cualquier concepto de “sistema” constructivo.

Lo que se expone en este capítulo quiere ser un estímulo por un enfoque integrado de los sistemas de fachada, que sea consciente de las consecuencias que pueden tener las decisiones tomadas; por un enfoque sensible a los fundamentos del diseño sostenible, a la calidad de los materiales de construcción, a la gestión programada de los procesos y el factor humano y medioambiental.

3.2 La innovación histórico-tecnológica: desde los sistemas constructivos tradicionales hasta las “fachadas ventiladas”.

La generación de las nuevas formas arquitectónicas o de técnicas constructivas no es nunca casual ni es consecuencia de una invención instantánea, sino que responde a un largo proceso, que comienza con la maduración de unas ideas, a veces responde a un deseo intemporal que de repente encuentran las circunstancias y los medios para poder desarrollarse.

Es el caso de las fachadas ligeras, cuyos antecedentes han precisado no solo el desarrollo de la tecnología adecuada que las haga posible, sino de una evolución de las ideas formales que se tenían de la arquitectura para poder asumirlas y para entregarlas en un nuevo concepto estético.

En realidad, desde una visión antropológica todos los útiles humanos no son sino extensiones de las propias capacidades corporales del hombre, y la arquitectura correspondería, tras el vestido, a una segunda piel capaz de crear una mayor protección climática y un ámbito de privacidad.

Estas técnicas de construcción ligera tienen, no obstante, poco papel en el desarrollo de la arquitectura mundial por su fragilidad, y lo que se hace durante muchos años es una arquitectura de muros de carga compuesta por materiales pesados que forman el sistema estructural a la vez que el cerramiento. Tiene que surgir un movimiento constructivo, como el gótico, para que se pueda intuir de nuevo en esa analogía biomorfica que separa la función protectora de la piel de la sustentante de la osamenta. Es un afán de ligereza y luminosidad, este estilo ideado en la Edad Media crea un sistema estructural de nervaduras que conducen las cargas a unos arcos inclinados o arbotantes, liberando a los muros de la necesidad de soportar las bóvedas, con lo cual pueden ser estos finos y transparentes.

El material generalmente utilizado en la construcción de los cerramientos verticales, durante más de seis milenios, es el ladrillo de arcilla. Su primer uso data del quinto milenio antes de Cristo, como atestiguan los restos de cabañas que se encuentran en la ciudad de Hassuna en el Irak de hoy. El tamaño y la forma de los bloques utilizados son difíciles de distinguir, ya que, aunque el barro había sido mezclado con paja o arbustos triturados,

los bloques no habían sido ni espolvoreados con arena ni hecho secar antes del uso, así que habían penetrado el uno en el otro. En estas construcciones, en los depósitos subterráneos para los cereales se encuentra el uso de una técnica utilizada para el acabado de protección constituido de una capa de betún y de enlucido de yeso.

El uso de los ladrillos cocidos aumentó, especialmente en áreas donde se necesita la protección de la lluvia, y sus tamaños permanecieron casi uniforme y así hasta la caída final de Babilonia, que se produjo en el siglo VI a. C. Los ladrillos cocidos tenían un tamaño de 30x30 cm de lado y de altura de unos 8 cm. El betún era el primer recubrimiento utilizado para la protección de las tormentas.

La arquitectura asiría difiere poco de la tradición del sur de Mesopotámia y los métodos de construcción de los cerramientos verticales exteriores presentan pocas innovaciones, aunque es mucho mayor el uso de la piedra. Esta procedía del norte de Irak y especialmente de las canteras de la zona de Nínive. Las calidades varían de una piedra caliza fina yesosa hasta un yeso de color gris oscuro que puede tener una superficie muy lisa, utilizado, este, sobre todo como recubrimiento.

Para verificar un cambio real, se debe esperar hasta el 1300 a.C., un período que data del primer ejemplo de “frontera” con cavidad. La *mastaba* (nombre dado por los egipcios modernos a las viviendas de los faraones de la dinastía IV-V), de ladrillos de barro de los primeros reyes estaban equipadas de paredes con paneles y con cavidades llenas de escombros; esta opción estaba orientada a garantizar una temperatura interna más baja, ya que

Egipto es un país donde hay preferentemente que defenderse del sol que de los otros posibles fenómenos atmosféricos.

La experiencia griega no parece proporcionar más informaciones sobre este tema, a diferencia de los Romanos que han dedicado mucha atención a los problemas de la degradación de los materiales de revestimiento, así como las metodologías que se pueden adoptar en caso de que se presente cualquier tipo de humedad.

Entre las piedras de construcción más comunes en Roma está el travertino *lapiz tiburtinus*, llamado de este modo porque sus canteras están ubicadas cerca de Tivoli (*Tibur*). Se trata de una piedra caliza de color crema o marrón. La toba, sin embargo, piedra ampliamente utilizada en Roma antes de la época de Augusto, se colocaba en grandes bloques y tenía que ser protegida exteriormente por el estuco.

Vitruvio enumera varios tipos de mármol de *travertino*, *toba* y *peperino*, señalando los puntos fuertes y débiles según los agentes atmosféricos a los cuales estaban expuestos: *“... La piedra extraída de canteras son fácil da trabajar y, si se ponen en posición reparada, sustentan sus cargas. Si se encuentra en lugares expuestos se combinan con el hielo y la escarcha, se reducen en polvo y se disuelven. En cambio, todas las piedras de travertino y las de esta especie son resistentes a las cargas y las intemperies, aunque no son inmunes al fuego...”*(Vitruvio, De Architectura, II).

Por último, en Vitruvio, se encuentra un escrito sobre el enlucido de los muros húmedos. Para las habitaciones en la planta baja él recomienda un

pedestal de 0,90 cm de yeso, mezclado con ladrillo cocido en lugar de arena, y luego recubierto de estuco.

"Pero si la humedad persiste, construyes una pared delgada un pocotas adentro de ella, como las circunstancias lo permitan; y entre las paredes formas un canal a un nivel por debajo de la planta baja, con aberturas por el aire; y si el muro ya está construido, construyes salidas cerca de la cima, porque, careciendo de ventilación, la humedad se propagará por todo el muro nuevo. A continuación, puedes proceder al enlucido...". Sin embargo, si no hay espacio para una pared con la cavidad de este tipo, él recomienda como alternativa lo que hoy llamamos una "barrera de vapor" que consiste en una capa impermeable en posición vertical.

De hecho, por lo tanto, ejemplos de paredes ventiladas ya se conocen en la época romana, precisamente para eliminar la humedad y la condensación, pero también para producir calor artificial desde abajo.

En los tiempos romanos hubo un cese de la evolución de las tecnologías que se utilizaban en la construcción de cerramientos verticales: en efecto, además de los ladrillos usados para propósitos estructurales, los bizantinos no tenían ninguna objeción a su uso como material para recubrir la fachada, sólo con fines decorativos.

La primera información que se conoce, sin embargo, de paredes hechas con paneles se remonta al siglo XIII y se refiere a los paneles de pino noruego, especialmente importadas para el Castillo de Windsor. Los paneles fueron utilizados como cierres de la dependencia. Los paneles eran tablas

encajadas en el marco cuyo espesor fue disminuyendo poco a poco hasta que, en 1540, no llegó a más de una pulgada.

La revolución industrial y el uso del hierro en la construcción también conducen a un fuerte cambio en el campo de los cerramientos. Gragg, en 1869, patentó, de hecho, un sistema de fabricación basado en el uso de paredes hechas de losas de color pizarra colocados en molduras exteriores, con un método similar a lo de hoy de enclavamiento de placas de vidrio en perfiles metálicos. El primer ejemplo de una estructura a esqueleto básica lo hay, en cambio, con la fábrica de chocolate en Noisiel-sur-Marne de Jules Sauliner (Figura 3.2.).

El hierro vino a revolucionar la historia de la construcción al permitir abordar mayores luces con una estructura que se afina hasta lo inverosímil. Los muros desaparecen como tales, para convertirse en rejillas formadas por vigas y soporte que propician la idea de crear fachadas ligeras, y surgen estas de forma espectacular de la mente de los ingenieros. Todos reconocen como primer gran ejemplo de construcción ligera del siglo XIX al Cristal Palace de Joseph Paxtón, gigantesco invernadero creado para la Exposición de Londres de 1851 (Figura 3.3.).



*Fig. 3.2. Fábrica de chocolate de Jules Sauliner.
(arquitecturamashistoria.blogspot.com)*



*Fig. 3.3. Cristal Palace de Joseph Paxtón.
(arquitecturamashistoria.blogspot.com)*

Es el siglo XIX, un siglo lleno de records y de inventos, que encontraron su escaparate en los palacios de las Exposiciones Universales y en grande construcciones civiles como las estaciones de tren. Son unos años en los que se crea una importante construcción industrializada y en los que aparecen los antecedentes de los paneles de cierre ligeros. Así, el primer edificio conocido que utiliza las chapas de hierro en sus fachadas es el Almacén naval de Sheerness, construido en 1858 por el ingeniero G.T.Greene (Figura 3.4.).

En Estados Unidos, el hierro sirvió para la producción rápida de fachadas en un momento de expansión económica. En principio no se buscaba la creación de una nueva topología de muro sino la imitación de la prestigiosa apariencias de las construcciones en piedra, aunque algunos ejemplos como la factoría de James Bogardus en Nueva Cork, de 1848, consiguen sintetizar las líneas de una fachada ligera de chapa y vidrio que se desarrollaron a final de siglo en ejemplos como el Reliance Building de Burnham y Root (Figura 3.5.), rascacielo de cinco pisos construido en Chicago en 1895, o en grandes almacenes de la época, como los Roosevelt

Stores en Broadway, N.Y., los Jelmoli en Zurich, o lo Hermann Tietz en Berlin (Figura 3.6.).



Fig. 3.4. Almacenes Naval Sheernes de G.T.Greene. (Diccionario Akal de la arquitectura del siglo XX, Jean-Paul Midant)



Fig.3.5. Reliance Building de Burnham y Root. (Diccionario Akal de la arquitectura del siglo XX, Jean-Paul Midant)



Fig. 3.6. Almacenes Hermann Tietz. (Diccionario Akal de la arquitectura del siglo XX, Jean-Paul Midant)

Se llega así al 1909, cuando London Building Act permitió la reducción del espesor mínimo fijado por los cerramientos exteriores de un edificio, aunque si esta se había reducido, desde un punto de vista funcional, en una serie de paneles, ligeros y resistentes a los agentes atmosféricos, sujetos con vigas de acero a la altura de cada piso.

El concepto de fachada ligera, como se puede ver, ya estaba creado al final del siglo XIX, pero se asociaba exclusivamente con el vidrio, lo cual queda patente en construcciones como las naves de la Margarete Steiff GmbH (Figura 3.7.) en Giengen/Brez, de 1904, que con sus paredes totalmente acristaladas anticipan, aún con mayor radicalidad, los parámetros vítreo de la fabrica Fagus de Walter Gropius, de 1910.



Fig.3.7. Fabrica de Margarete Steiff GmbH. (Diccionario Akal de la arquitectura del siglo XX, Jean-Paul Midant)

Tiene que pasar varias décadas para que se clarifique la idea de la moderna construcción reticular en la que se dispone un esqueleto estructural cerrado y compartimentado, con piezas superficiales que actúan como membranas y que pueden ser transparentes u opacas. En realidad estas membranas podrían ser todo lo finas que se quisiera porque no afectan a la estabilidad de la construcción, y si no son como laminas de papel es por la necesidad de cumplir las funciones de aislamiento térmico y acústico, problemas que resuelven los nuevos productos químicos creados a lo largo del siglo XX, que permiten reducir el grosor de las fachadas y de los tabiques.

Otro principio por el que se debería regir esta nueva construcción sería, además de la ligereza, la tipificación sistemática de los elementos que permita la industrialización y fabricación en serie. Le Corbusier ya lo intuye cuando en 1922 habla de su casa Citrohan, y que aún poniendo sus miras en la funcionalidad de estos artefactos, fue realizada en Weisenhof en 1927 mediante técnicas tradicionales. En el mismo lugar Walter Gropius proyecta su casa con muros exteriores de fibrocemento de 6 cm de ancho relleno de corcho prensado y enlazados por perfiles metálicos (Figura 3.8.).

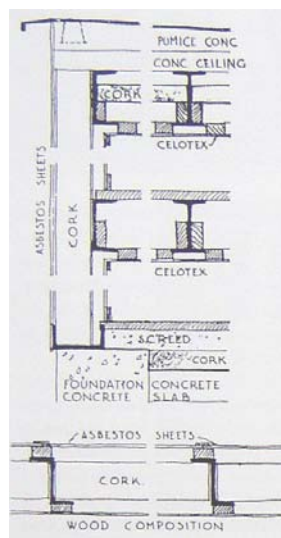


Fig. 3.8. Sección de fachada de la casa de la Weissenhof, Walter Gropius. (Tectonica 1, Envolverte(I), fachadas ligeras, pag.7)

El descubrimiento, por último, de los materiales capaces de asegurar un buen aislamiento térmico con un espesor mínimo, llevó a la creación de un sistema de cerramiento con "abrigo", cuyas primeras aplicaciones se realizaron en Canadá cerca de los años '60 y más tarde en Suiza, pero es en Francia, donde ha sido especialmente desarrollada esta tecnología, desde los años 80, con el desarrollo de sistemas de recubrimiento aislante, ligero, y fiable con respecto a la penetración del agua y con tiempos de aplicación significativamente reducidos.

3.3 Innovación Tecnológica.

El mundo de la construcción arquitectónica vive un momento interesantísimo. Los cambios se producen a una velocidad cada vez más acelerada y las posibilidades de innovación se abren incluso para las formas más sencillas de la edificación. En muy poco años hemos olvidados practicas que parecían absolutamente consolidadas, como la cubierta convencional o el tabique de cerámica. Esta situación seria absolutamente deseable si se

tuviese una manera rápida y económica de controlar las consecuencias de cada alternativa, y sobre todo, si se dispusiera de un modelo técnico de referencia, un objetivo ampliamente compartido con el que cotejar cada propuesta.

Esta resultando extremadamente difícil el tema del cerramiento exterior, sobre todo el cerramiento vertical, es decir, la fachada. Las convergencias de conflictos es abrumadora: la fachada es la imagen que el edificio ofrece a la ciudad y eso sugiere intereses relacionados con la composición, la coherencia urbana o el prestigio. Además y, sobre todo, es un límite protector de diseño cada vez más sofisticado. Hasta hace pocos años todo se resolvía con el espesor: más frío exterior, más grosor del cerramiento; más carga, más grosor; más lluvia, más grosor etc.. Hoy se superponen delicados e inteligentes materiales para resolver una fachada cien veces más eficaz con un espesor escaso. Pero, como insistía el biólogo Ramón Folch, a los arquitectos nos cuesta aceptar que la fachada es una sofisticada membrana que tiene que diseñarse como tal. Una membrana a la que se le encomienda el control de los más diversos aspectos:

- control del flujo térmico
- control del flujo de aire
- control de vapor de agua
- control del movimiento del agua
- durabilidad de los materiales
- comportamiento frente al fuego
- resistencia y rigidez

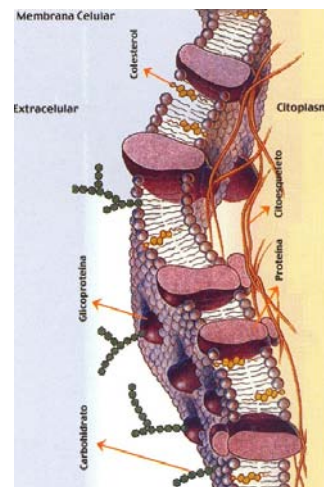


Fig. 3.9. Membrana celular. (La fachada ventilada y ligera, Cristina Parda / Ignacio Paricio)

La velocidad en la innovación es especialmente crítica en el campo de las soluciones constructivas de fachada. Hace ya unos diez años se anunciaba la crisis de la fachada convencional. Las incoherencias de unos cerramientos insertos entre forjados, pero que fingen pasar por delante de su canto, han provocado muchos pequeños y algunos grandes fracasos constructivos. La solución empieza a ser muy criticada, pero no está claro que sean estas incoherencias la que estén desechando la solución, sino inconvenientes procedentes de otras áreas, sobre todo la composición arquitectónica. La forma lógica de construir con fábrica de ladrillo y estructura porticada contradice la imagen falseada de superficie continua, imagen que

generalmente busca el arquitecto. La ejecución de las paredes medianeras evidencia cuales son las reglas coherentes con ese sistema constructivo.

La evolución hacia la fachada ventilada se ha consolidado en esta última década. Dejamos la hoja exterior de ladrillo como cerramiento libremente dilatable, para ir a buscar pieles exteriores diversas. En general se recurre a piezas poco pesadas que se cuelgan de la hoja interior o de entramados secundarios situados entre los forjados.

Le Corbusier en *Manière de penser l'urbanisme* (1946) decía “...la separación entre las estructuras portantes y las partes portadas: el esqueleto es independiente y va hacia abajo para buscar un punto de apoyo en el suelo, sin el uso de los tradicionales muros de cimentación. La fachada, ya no vinculada a una función portante, puede ser una simple membrana que aísla el interior desde el exterior”. La descomposición corbusiana está claramente destinada a optimizar la calidad del aspecto funcional de las diversas partes del edificio pero es un preludio de la descomposición de la cultura productiva de los años sesenta y setenta, creada como consecuencia de la necesidad de prefabricar los componentes en serie mediante la organización industrial. En la definición de "la conversión de la construcción al método industrial". Guido Nardi en 1977 hablará del "edificio pensado como organismo definido por la integración de los componentes, cada uno de los cuales, aunque se hayan producido de forma independiente, debe ser considerado como un elemento relacionado en un conjunto".²

En la misma línea de pensamiento nace en los años noventa el concepto de la construcción con múltiples capas (tipo *sándwich*) como el

² (Guido Nardi, *Progettazione architettonica per sistemi e componenti*, Franco Angeli, Milano, 1977, pg.39)

cierre ideal de un círculo, de la descomposición cualitativa de Le Corbusier se pasa la descomposición de la producción de la era industrial para volver a una descomposición con aún más empuje, pero más motivado por consideraciones de carácter cualitativo. En la construcción tipo *sándwich*, de hecho, la parte de ladrillo se divide aún más empezando desde las prestaciones que se le requiere y se recompone dando a cada capa una función única. En otras palabras, la construcción a *sándwich* se puede entender como una cierta “actitud” en la búsqueda de calidad en las actividades de construcción, una calidad que corresponde a la individuación de una respuesta tecnológica única adecuada a la singular situación de proyecto. En particular, para cada respuesta tecnológica única adecuada a la singular situación del proyecto se entiende la solución de diseño más idóneo para crear las prestaciones buscadas en la unidad tecnológica actuación o, más generalmente para satisfacer las necesidades del sistema³.

A nivel operativo, el uso de la construcción tipo *sándwich* tiene tres consecuencias fundamentales: el diseño de soluciones tecnológicas, la integrabilidad de los dispositivos básicos; el mantenimiento de los dispositivos⁴.

El diseño se transforma en un proceso aditivo de la definición de soluciones de tecnología que, dependiendo de la situación, usan adecuados componentes especializados en la satisfacción de los resultados específicos. Las soluciones tecnológicas nacen, por lo tanto, de la articulación de elementos compuestos a través de una serie de capas funcionales

³ (Zambelli, Vanoncini e Imperadori, *Costruzione stratificata a secco. Tecnologie edilizie innovative e metodi per la gestione del progetto*, Maggioli editore, Santarcangelo di Romagna (RN), 1998, pg.16)

⁴ (Zambelli, Vanoncini e Imperadori, *Costruzione stratificata a secco. Tecnologie edilizie innovative e metodi per la gestione del progetto*, Maggioli editore, Santarcangelo di Romagna (RN), 1998, pg.16)

especializados. Cada dispositivo utiliza materiales apropiados para lograr los específicos rendimientos cada vez más complejos. Los materiales que se usan son siempre más numerosos: desde los tradicionales, reinterpretados en nuevas técnicas, a los experimentados en diferentes áreas y adaptado a la construcción, hasta los que se podrían, a su vez, definir estratificados o especializados ya que son el resultado de la unión de diferentes materiales.

Los dispositivos desarrollados, por lo tanto, no se han finalizado realmente o fijos en su diseño, más bien abiertos a continuos ajustes estructurales y funcionales que en muchos casos comportan la integración o la sustitución de elementos. De acuerdo con esta flexibilidad, los dispositivos deben ser integrados, listos para recibir cambios y modificaciones importantes. La construcción tipo sándwich, incluso cuando está montado en seco, es capaz de practicar esta flexibilidad y integrabilidad con el uso de la conexión lógica reversible. Cada elemento perteneciente a un dispositivo específico puede ser así sustituido por otro elemento que enriquece la oferta de funcionamiento del producto, sin alterar las relaciones y la estructura del mismo, o le devuelve funciones perdidas debido a la degradación relacionada con el uso.

En consecuencia, las fachadas ventiladas sin duda pueden ser concebidas como el producto de un proceso de estratificación y la especialización funcional de los elementos que componen⁵.

Al rechazar el modelo del edificio monolítico, fundado sobre la gravedad, las baldosas montadas a secos hacen suya la lógica de la

⁵ (Andrea Campioli, L'evoluzione del laterizio e Della terracotta nell' involucro degli edifici” In *tecnología e architettura. Pareti ventilate: una scelta per il 2000*, allegato rivista *Costruire*, noviembre 1998)

estratificación de adentro hacia afuera (en lugar de abajo hacia arriba, como en gran parte de la construcción clásica).

Progresivamente, la capa de revestimiento, o la segunda piel del edificio, que a menudo tiene la función expresiva de todo el edificio, se ha adelgazado y retirado de la pared y de los elementos portantes, dejando que entre el recubrimiento y la capa exterior resistente se generaría un canal de ventilación. En las paredes ventiladas esta piel se ha desarrollado - para usar las palabras de la Zambelli⁶ en un "escudo" que, con espesores muy inferiores a los de las antiguas paredes de carga de las paredes de ladrillo, por un lado consigue defender mejor al edificio de los tradicionales problemas atmosféricos, por otro lado se convierte en una interfaz entre el edificio y el medio ambiente.

Diseñadas, por lo tanto, como un dispositivo de control de las condiciones termo-energéticas del edificio, las fachadas ventiladas, que se han clasificado como una capa añadida al edificio tradicional, se articulan en diferentes capas especializadas en determinadas funciones o rendimiento. La capa más interior está diseñada principalmente para poder anclar el entero dispositivo, en segundo lugar, para compensar cualquier irregularidad en los elementos de soporte y aportar un apoyo valioso a la capa de recubrimiento. El nivel exterior (el revestimiento) es, sin embargo, el responsable de la protección del edificio de los agentes atmosféricos. Ambos se combinan para provocar movimientos verticales dentro de la pared estos movimientos son debidos a la convección del aire que pueden aportar beneficios en términos

⁶ (Ettore Zambelli, *Linee di tendenza delle tecnologie di assemblaggio a secco, in Tecnologia e architettura. Pareti ventilate: una scelta per il 2000*, Costruire, 1998),

de reducción del calentamiento del edificio así como provocar la reducción de la pérdida de calor.

Durante unos años se ha creído que el modelo de los países norte europeo se iba a extender entre nosotros. Se proponía la fachada ventilada de albañilería como la opción más razonable, y el camino a seguir que habían abierto estos países más exigentes y adelantados. Recordar que esa fachada se basa en la construcción de una hoja de medio pie que pasa por delante de los forjados, es libremente dilatada y forma una cámara de aire ventilada que oculta el aislamiento térmico. Es una solución impecable desde un punto de vista físico.

Su único inconveniente reside en la limitación que impone la estabilidad de una hoja tan esbelta. La normativa no permitía llevar esa hoja exterior de medio pie más allá de los once metros de altura. Para edificación de más de tres plantas, eso supone buscar un apoyo en los bordes del forjado, con lo que la solución continua siendo valida, pero hace difícil reducir los puentes térmicos y complica mucho la ejecución.

Esa altura se conseguía con una hoja de medio pie que ya resulta demasiado gruesa, onerosa y lenta de construcción para las exigencias contemporáneas. Sin embargo, la técnica de la albañilería no permitía adelgazar mucho ese grosor. Se ha llegado a trabajar con ladrillo de 9 cm para paramentos de trece metros de altura, como en la obra de Cabieces, de la cual se recuerda los conceptos fundamentales:

- La hoja exterior debe poderse mover liberalmente. La frecuencia de juntas entre sus paramentos y las relaciones con la hoja interior debe diseñarse para permitir estos movimientos.
- La cámara de aire garantiza la estanqueidad. Las relaciones entre hojas y entre estas y el hueco deben diseñarse para asegurar la continuidad de esa protección.
- Es conveniente que el aislamiento térmico se coloque en la cámara exterior de la hoja interior para revestir el canto de los forjados y garantizar la continuidad de su protección.

En esta evolución acelerada es muy importante tener claro los conceptos fundamentales para poder valorar las propuestas de los industriales o las ocurrencias de los constructores.

Más de un ejemplo de la arquitectura española adopta algunos aspectos de la fachada ventilada sin explotar sus posibilidades.

La característica técnica fundamental de este tipo de fachada radica en el mecanismo que utiliza para conseguir la estanqueidad. Hasta hace pocas décadas, el recurso único era el espesor. Muchos autores coinciden en recordar la frase de Johanson en 1946, que ilustra las primeras dudas sobre la estanqueidad por espesor y sugiere el camino hacia la solución actual: *”es claramente poco inteligente dejar que los muros, sean de ladrillo o mortero poroso, se mojen. Absorben agua como un secante, y sería un gran adelanto si alguna pantalla exterior repelente al agua pudiese añadirseles por el exterior...Esa pantalla podría colocarse de manera que el vapor de agua proveniente del interior pudiese evacuarse por ventilación en el espacio entre*

pantalla y muro...” A continuación aconseja usar material poroso y aislante en el muro así protegido.

El redactado es sugerente pero lo cierto es que, desde hacia siglos, la construcción estaba utilizando las cámaras drenadas para evitar la penetración de agua y, desde hacia algunas décadas, lo estaba aplicando al *cavity wall* anglosajón (Figura 3.10.).

Este mecanismo histórico pretendía conseguir la desaparición de cualquier fuerza con alguna componente horizontal que actuara sobre el agua en el grosor de la fachada. Se trata de que la única acción sobre la gota de agua sea la gravedad, y de que esta fuerza mueva las gotas de líquido en una dirección conocida, de manera que un correcto dispositivo geométrico la conduzca hacia el exterior del edificio.



Fig. 3.10. Cavity Wall. (Progettare le chiusure verticali, A. Perago)



Fig. 3.11. Tabique pluvial gallego. (La fachada ventilada y ligera, Cristina Pardal / Ignacio Paricio)

Como se ha dicho antes, tradicionalmente, los cerramientos protegen del agua gracias a su espesor. Los materiales con los que siempre se han ejecutados los muros eran más o menos porosos y generalmente permeables. El agua migraba por su masa hacia el interior del edificio, pero su espesor solía ser suficiente como para que difícilmente llegasen a aparecer humedades en la cara interior. Antes de que eso ocurriese cesaba la lluvia, y la evaporación superficial reducía el agua en el plano exterior y invertía el sentido del proceso migratorio hasta secar completamente el muro.

En los casos en los que el espesor difícilmente podía ser suficiente para resistir la duración de las lluvias se recurría a protecciones especiales como los empizarrados gallegos, las pinturas bituminosas valencianas o las cerámicas de otros lugares (Figura 3.11.).

Los mecanismos que mueven el agua hacia el interior del muro son varios aunque, a nuestros efectos, pueden resumirse en dos: tensión superficial y diferencia de presión. Ambos conducen el agua a través de la red de canalillos, porosos conectados o micro fisuras del material de la fachada.

Hasta ahora se ha hablado más bien de la cámara “drenada” que ventilada, se podría suponer que este tipo de cámara es una novedad de la moderna ciencia de la construcción. Nada más erróneo. Las cámaras drenadas son un invento de orígenes muy antiguos. Podrían encontrarse precedentes en algunas formas de protección en muros de sótanos de edificios clásicos.

La tradicional cubierta de teja sobre los sobrados de la casa rural utiliza en realidad un mecanismo análogo. La teja es absolutamente permeable, su

cara interior puede empaparse, pero esta superficie interior se secará por ventilación.

Y en el mundo de los parámetros de fachada, la más maravillosa aplicación de la teoría de la cámara drenada es el tabique pluvial catalán. El muro de albañilería encuentra el espesor idóneo para equilibrar la migración del agua debida a la lluvia por encima del medio pie de ladrillo.

La fachada “estanca”, es decir, la que esta formada por piezas selladas en su haz exterior, ha sido, pues, una alternativa hasta hace pocos años. Hoy esta en pleno declive. Todos están ya de acuerdo en recurrir a las ventajas del drenaje que se han descrito y el camino apunta cada vez mas firme hacia alguna de las formas de fachada ventilada.

Hace ya una década se pensaba que la fachada ventilada de ladrillo seria la solución optima por el futuro, pero esto no ha correspondido al aval internacional que tenia.

La dificultad de apoyo en cada forjado o el peso excesivo de la hoja exterior de albañilería no explica por si sola el escaso éxito de la fachada ventilada apoyada. Se podrían añadir otros factores que pueden justificar la evolución hacia una hoja exterior más ligera, como una mano de obra carente de oficio, el deseo de mejorar las calidades optando por sistemas más industrializados, la reducción de los plazos de entrega de la obra, etc. En definitiva, intentando minimizar costes mejorando la calidad, y para ello la industrialización es crucial.

No obstante, se cree que la razón fundamental del fracaso de la fachada ventilada de albañilería reside en la limitación compositiva que impone.

La composición arquitectónica ha encontrado en la fachada de hoja exterior ligera la alternativa a la rigidez impuesta por la fachada convencional o la de hoja exterior pesada. Se trata de sustituir el muro apoyado de ladrillo por una hoja exterior, formada por unas piezas ligeras colgadas de hoja interior mediante fijaciones.

Esta solución permite muchas ventajas a la composición arquitectónica. Por una parte, permite una gran libertad de materiales: la piedra, los plásticos, las chapas metálicas, las maderas y sus derivados se ofrecen como texturas diversas, y como acabados capaces de cualquier color y despiece.

Una hoja exterior colgada, formada por piezas más o menos ligeras, puede fingir cualquier despiece y adaptarse a cualquier tipo de huecos, puede cambiar de material y color, incluso puede sustituirse con los años con otro revestimiento.

Sin embargo, como tantas otras veces en el desarrollo de la construcción durante este último siglo, la evolución que ha estado protagonizando parece profundamente desorientada. En ningún momento ningún organismo pensante en algún lugar del continente europeo ha promovido con fuerza suficiente una investigación para diseñar una solución constructiva que hiciese frente a las carencias de los sistemas anteriores y atendiese al deseo de la arquitectura contemporánea. Nadie ha enunciado

con rigor los objetivos que esa nueva fachada debe satisfacer, ni se ha asegurado que haya una combinación de materiales y detalles constructivos que lo cumplan.

La evolución sucede de manera absolutamente parcializada. Se introduce un material en la hoja exterior sin saber como afecta a los movimientos de aire en la cámara ventilada, se aligera la hoja interior sin pensar en la consecuencia acústica o de estanqueidad del aire, se optimiza el macizo sin pensar en el hueco, se trabaja en la carpintería sin pensar en la protección solar, etc.

Muchas razones explican esa combinación de buenas intenciones con una visión parcial del problema. La más importante afecta a industrias y proveedores de materiales muy diversos. ¿Qué sabe el que cuelga la piedra de lo que ofrece el cartón yeso? ¿Quién debe explicar a los grandes fabricantes de semiproductos la necesidad del diseño y puesta en el mercado de nuevo material para resolver la potencialmente interesantísima hoja central? ¿Qué sabe una empresa de gres porcelánico del funcionamiento de una chamarra drenante/ventilada?

En los últimos años se han propuesto y ensayado una serie de técnicas constructivas, cada una de la cual puede aportar soluciones a aspectos parciales de la fachada ligera. La sabia combinación de estas propuestas, ya comprobadas, podría estar en situación de diseñarla colectivamente, como un “*collage*”, esa es la nueva fachada que hoy se necesita.

La evolución hacia la fachada de hoja exterior colgada no supone un giro revolucionario en la concepción constructiva del cerramiento. Varias experiencias anteriores, hoy plenamente consolidadas, han servido de precedentes y han puesto a punto el utillaje para poder afrontar su diseño sin sobresaltos:

- los aplacados de piedra colgados
- la tecnología del muro cortina

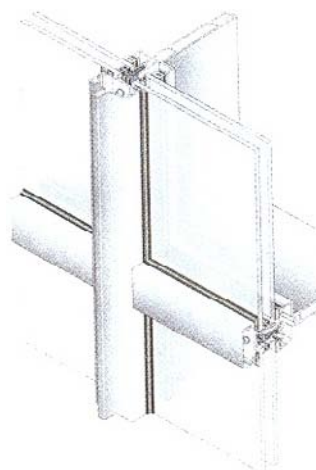


Fig. 3.12. Muro cortina. (La fachada ventilada y ligera, Cristina Pardal / Ignacio Paricio)

La más conocida es la técnica de revestimiento de piedra, que hace casi cincuenta años se despegaron de la parte más sólida de la fachada y empezaron a concebirse como piezas sueltas colgadas del muro mediante unas fijaciones que permitían su libre dilatación. Sin saberlo se esta construyendo fachada ventilada de hoja exterior colgada. Solo ha sido necesario aumentar la anchura de la cámara, interponer un aislamiento térmico y ajustar la separación de las piezas de la piedra para convertir esa solución ya convencional en una moderna fachada de hoja exterior libremente dilatada y emanara ventilada y drenada.

Las primeras fijaciones que se emplearon para anclar la hoja exterior de la fachada ventilada consistían en elementos puntuales que no disponían de sistema de regulación espacial. La obtención de un plano de fachada bien aplomado y con juntas correctamente niveladas dependía exclusivamente del buen hacer del operario.

Con el objetivo de minimizar el número de anclaje sobre la hoja interior y facilitar la nivelación de la hoja exterior, aparecen los sistemas de fijación por medio de rástreles.

En ningún momento estas nuevas formas de aplacado difundidas por los explotadores de las canteras españolas intentaban cambiar el funcionamiento de la fachada. Es difícil pensar que nadie tuviese en mente el paralelismo de la cámara así formada con las soluciones de albañilería anglosajona. Ni siquiera se encuentran comentarios asociando esta solución a la idea de cámara ventilada.

Hasta hace poco, por fachada ligera se entendía casi exclusivamente el tipo de cerramiento vertical construido con la tecnología del muro cortina. Los muros cortina se popularizaron en los cincuenta como una solución ligera e industrializada que dignifica la imagen de los edificios de oficinas, una técnica de fachada bastante costosa en la que predomina el cerramiento de vidrio fijo. Sin embargo, de esta técnica también puede hoy aprender mucho la fachada ligera, con su predominio de macizos y composición no subordinada al subrayado vertical de los maineles de aluminio.

El muro cortina, que popularmente se caracteriza por ser un cerramiento de fachada vidriado, no podría existir sin el tramo ciego. Todo

perfil de muro cortina permite la inserción tanto de paneles de vidrio como paneles sándwich que, además de cerrar el espacio interior, suplen la ficción de aislamiento térmico que en la parte vidriada aporta el vidrio con la cámara.

Perforaciones estratégicas dispuestas en el espesor permiten establecer un equilibrio de presiones entre el exterior y la cámara para anular cualquier posible fuerza de succión.

Todos los mecanismos son los mismos que se explican en las fachadas ventiladas y eran, por lo tanto, perfectamente conocidos por los expertos en muro cortina. Pero la herencia más directa ha sido el montaje externo de la estructura como soporte de la hoja exterior.

Los montantes diseñados para el muro cortina han empezado a ser utilizados fuera de su contexto como soporte de todo tipo de cerramiento. Diferentes tipos de materiales más o menos ligeros pueden colocarse sobre estos montantes para dar la imagen del edificio.

Las experiencias descritas están permitiendo una fácil implementación de esta fachada ventilada, que resuelve los problemas de la fachada convencional y resulta atractiva para el diseño arquitectónico.

La composición primigenia de esta nueva fachada consiste en una hoja interior en ladrillo inserta entre forjados y con su cara exterior enrasada con el canto de estos. Dependiendo de las cargas que el resto de los elementos de la fachada transmitan a esta hoja interior, se resolverá con ladrillo hueco de 10 o 15 cm de grosor o con ladrillo perforado.

Sobre esta superficie continua se extiende el aislamiento térmico, generalmente formado por placas de poliestireno expandido o espuma de poliuretano proyectado, y del que emerge el sistema de anclajes que permitirá disponer la hoja exterior que conforma la cámara y da la imagen al edificio.

Entonces, la hoja exterior tiene dos funciones principales:

- dibujar la imagen exterior del edificio
- cerrar la cámara ventilada formando una primera barrera de protección

La hoja exterior suele estar formada por piezas de tamaño discreto y de materiales diversos. El proyectista dispone de un amplísimo abanico de posibilidades para vestir el edificio.

Se podría distinguir una hoja exterior más pesada, formada por piezas de piedra natural o piedra artificial, de una ligera constituida a partir de materiales que, o bien tienen un peso específico bajo, tipo Naturvex o Prodema, o son materiales pesados como el acero, trabajados en láminas de poco espesor.

En este juego formal hay sitio para todos los materiales imaginables, las características particulares de cada uno de ellos establecen sus posibilidades de integración en la fachada. Esta puede llegar a variar mucho incluso entre materiales de una misma familia.

En el caso de la piedra no será lo mismo trabajar con un granito o una arenisca. Cada una de ellas tendrá valores muy distintos para la resistencia,

dureza, porosidad y cohesión, ofreciendo distintas posibilidades de acabados, formatos y sistemas de ejecuciones. Los revestimientos en piedra son capaces de crear en el edificio efectos diversos, simplemente aplicando distintos acabados. Muchas piedras permiten ser agujeradas, flameadas, abrillantadas, pulidas etc. También se puede esculpir creando superficies con fuerte relieve.

En la fachada del Hotel Four Season de Berlín (Figura 3.13.) la piedra se cortó y ensambló para formar una placa con una parte central inclinada, fijada en ambos lados a prismas verticales de sección rectangular. De esta forma se genera un juego de sombras horizontales en la fachada.

El más serio competidor de este material es el gres porcelánico. El proceso de industrialización por prensado al que se somete la arcilla permite acabados similares a los de la piedra, tanto en colores como en texturas, pero en un material homogéneo y de comportamiento previsible. Su coeficiente de absorción es muy bajo, por lo que tiene buen comportamiento a las intemperies. Es muy durable: su desgaste es prácticamente nulo, ya que tiene una elevada resistencia superficial.

Las posibilidades de la cerámica en fachada no terminan aquí. La cerámica tradicional, elaborada por un proceso de extrusión, facilita la obtención de forma de mayor complejidad pero más pobre en cuanto a los acabados. Las piezas que hoy nos ofrece el mercado permiten realizar fachadas que recuerdan a las tradiciones de obra de fábrica de ladrillo.

Renzo Piano ha sido precursor de este tipo de revestimiento en obra como las viviendas de la Rue de Meaux, el Ircam de Paris (Figura 3.14.), el

Centro de Congresos de Lyon y los edificios de Potsdamer Platz de Berlín (Figura 3.15.).



Fig. 3.13. Hotel Four Season, Berlin. (La fachada ventilada y ligera, Cristina Pardal / Ignacio Paricio)

Fig. 3.14. Fachada Rue de Meaux, Paris. (La fachada ventilada y ligera, Cristina Pardal / Ignacio Paricio)

Fig. 3.15. Potsdamer Platz, Berlin. (La fachada ventilada y ligera, Cristina Pardal / Ignacio Paricio)

Vázquez Consuegra es otro de los arquitectos que han diseñado una serie de piezas específicas, en este caso para la fachada del Archivo Regional de Castilla-La Mancha. La combinación de pocas piezas, ligeramente distintas entre ellas, le permite obtener una superficie de fuerte textura.

La madera es un material poco utilizado en España como revestimiento de fachada. Frente a su calidez, los metales aportan unos valores completamente distintos.

Desde el verde pálido de las delgadas chapas de cobre oxidado, hasta el marrón anaranjado del recio corten o al gris plata de la frágil lámina de

zincititanio que dibuja los volúmenes del Guggenheim. Las posibilidades son ilimitadas.

A estos elementos naturales se pueden acostar los materiales aglomerados que se pueden crear a partir de cemento o de resina. Estos permiten obtener colores más vivos y más puros.

La lista de materiales de aplicación en fachada ventilada se puede extender de forma ilimitada tratando las posibilidades que ofrecen las mallas metálicas, los textiles de PVC y similares, los mantos vegetales, etc.

De entre la sucesión de hojas de materiales diversos con un alto grado de especialización que conforman las fachadas hoy en día, la hoja más importante no es de material constructivo alguno. Es el aire que llena la cámara, el material más eficaz en la satisfacción de nuestros objetivos prioritario. Parece una paradoja pero es así. Disponer el mismo número de hojas, de idénticas características, pero sin preservar entre ellas el grueso del vacío, provoca la ineficacia de la envolvente.

Se puede tipificar las soluciones de fachada ventilada ligeras en función de la progresiva expulsión de esas fuera del canto del forjado. Así se puede distinguir:

- Montantes sobre albañilería
- Montantes estructurales
- La hoja intermedia

Definición y clasificación

Los sistemas que se encuentran hoy en día en el mercado a los cuales se le denomina comúnmente "Fachadas ventiladas" no siempre pueden englobarse en esta categoría.

La pared ventilada es un elemento técnico con una marcada característica de los sistemas que puede ser llamado 'sistema' en capas basado en el principio del paso de aire en la cavidad situada entre dos paredes verticales. La fachada ventilada puede ser realizada mediante la combinación y enlace entre dos sistemas diferentes, o poniendo una simple cavidad en el sistema de cierre vertical, con las aberturas necesarias para garantizar la ventilación.

Angelo Lucchini, en una publicación editada por Il Sole 24 Ore en 2000, define la fachada ventilada como un "muro opaco ... cuyo revestimiento exterior está compuesto de elementos diferentes (diferente forma, tamaño y materiales) ... montados a través de sistemas de suspensión y fijación de tipo mecánico o químico-mecánico, y cuyo otro lado está separado de la parte frontal de la pared interior, en el que suele haber un panel aislante no-absorbente o más bien un obstáculo para el agua y luego un aislante de lana, por medio de una cámara no muy ancha o de toda forma de tamaño suficiente para detener la continuidad física entre la piel exterior y las capas de la pared interior, y para permitir el paso del aire. "⁷

⁷ (Angelo Lucchini, *Le pareti ventilate; metodologia di progettazione e messa in opera di materiali e componenti*, Milano, edizioni il Sole 24 Ore, settembre 2000, pg.4)

Condición necesaria, entonces, para que un sistema de revestimiento exterior de un edificio pueda definirse como una fachada ventilada se necesita la capacidad de este dispositivo de inducir, en la cavidad creada por ella, el efecto chimenea, es decir, una corriente de aire caliente que sube desde el fondo hasta la cima y que lance, en los meses de verano, el exceso de calor a través de aberturas en la parte superior del edificio. También es esencial que estas aperturas se encuentren provistos de cierre, en los meses de invierno para detener el flujo de aire y permitir que el espacio intermedio asuma el papel de una cámara de aire aislante añadida.

Por tanto, se puede detectar como a menudo se definen, inadecuadamente, fachada ventilada a sistemas en los cuales el revestimiento es simplemente "distanciado" de las paredes interiores o, incluso, a dispositivos cuyo funcionamiento se ve comprometido por la inadecuada proporción entre las partes o por una no exacta evaluación de la coherencia del sistema con el contexto climático en el que se inserta y con el edificio en que se integra.

El resultado en términos de rendimiento de la pared ventilada no depende sólo de las propiedades de los materiales utilizados en la creación de la piel exterior, sino también depende de la integración con las otras partes del edificio (no hay que obviar las propiedades termodinámicas de la pared interior) o de las características de la subestructura, generalmente metálica, que soporta la piel exterior. El dimensionado incorrecto de la profundidad y de la altura de los conductos de aire puede perjudicar el funcionamiento del dispositivo; estrictamente hablando, la fachada debería ser dividida en "chimeneas" verticales continuas y no demasiado altas, las paredes verticales

de los conductos no deben permitir fugas o interrupciones del flujo de aire en el mismo canal, sino deben permitir la salida por la parte superior.

En el mercado de los productos de construcción se observa desde hace algunos años un aumento considerable de empresas dedicadas a la fabricación y producción de sistemas de fachadas ventiladas (o presuntas). La flexibilidad de uso de tales procedimientos constructivos y su capacidad para aludir a las texturas de la tradición, han hecho que naciera una rápida propagación de los mismos y han provocado un creciente esfuerzo en la investigación y en el consiguiente desarrollo de tecnologías. Mientras que las mayores empresas se especializan en la producción movida por las relaciones con los proyectistas para el desarrollo de sistemas siempre más precisos, los grupos más pequeños están empezando a ver un canal de producción, y una alternativa a los productos tradicionales, en el cual entrar.

Como parte de los sistemas de recubrimiento en seco, se hace inicialmente una clasificación de los tipos de fachadas. Las topologías entran todas las fachadas térmicamente aisladas, estas son:

1. Sistemas de fachadas ventiladas cerradas, juntas cerradas
2. Sistemas de fachadas a pantalla o de juntas abiertas

Esta subdivisión se hace eligiendo la ventilación como criterio para clasificar los sistemas de revestimiento en seco y así distinguir el comportamiento y la contribución a la eficiencia térmica de la envolvente del edificio.

La categoría de la “fachada ventilada” incluye a los sistemas que tienen diseñada una cámara de aire para crear una discontinuidad entre el interior y a la vez exterior y son capaces de mejorar la condición termo-energéticas del edificio. Estos dispositivos responden a la demanda, cada vez más frecuentes, de las soluciones tecnológicas que puedan mejorar el confort interior y contribuir al ahorro energético⁸. De hecho, el movimiento ascendente en la estación cálida, que proporciona aire caliente de abajo hacia arriba para que esta sea expulsada fuera, evita el recalentamiento de las paredes y por tanto, reduce el paso de calor dentro del edificio y, además, permite la evacuación del exceso del vapor de agua presente en la cavidad. En invierno, sin embargo, la presencia de aire en la cámara reduce la pérdida de calor. Si las proporciones entre las tomas de aire, la anchura de la cámara, y la forma estructural es correcta y además tenemos en cuenta las características y el tratamiento de los elementos del revestimiento, el dispositivo es capaz de reducir las cargas de energía en el interior.

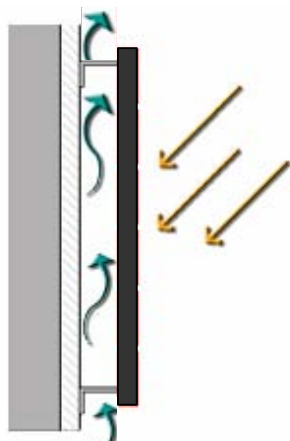


Fig. 3.16. Fachada ventilada. (Imagen del autor)

⁸ (Cfr. Caludio Pieri, *Recerca per l' innovazione dei sistema di rivestimento di facciata in laterizio*, in Giorgio Giallocosta, *Seminari di tecnologia dell' architettura*, Genova, Edizioni Coedit).

Las principales contribuciones que este sistema ofrece es la protección frente a los agentes atmosféricos. La mera presencia de una pantalla opaca sobre la pared interior del edificio, reparándolo de la radiación directa, permite el control del soleamiento y, en consecuencia, una reducción de la carga de calor del edificio en verano.

El revestimiento exterior, en realidad, tiene el doble papel. Reflejar la radiación solar y evitar el recalentamiento de las paredes del edificio, por un lado, y por otro permitir el paso dentro de la cámara de aire de parte del calor acumulado y así activar el efecto chimenea para favorecer el fenómeno de la ventilación natural anteriormente dicha.

Estos sistemas, al igual que cualquier revestimiento, permiten también una excelente protección contra la acción del viento y de la lluvia.

Como cualquier sistema de revestimiento alejado de la pared interior, además, ayudará a evitar puentes térmicos y la presencia de condensación intersticial.

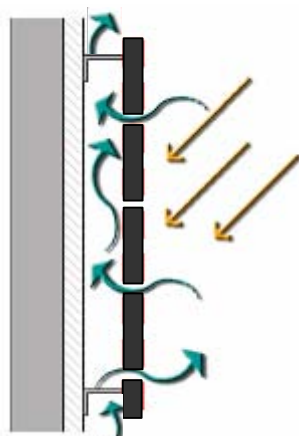


Fig. 3.17. Fachada a "Pantalla". (Imagen del autor)

En los casos de paredes de juntas abiertas en la fachada, se crea una especie de ventilación en una dirección horizontal, no vertical, que contribuye, aunque lentamente, al intercambio de aire y por lo tanto a la dehumidificación y el refrescamiento en verano. Este tipo de solución - como dice Sergio Croce en su discurso en la conferencia en el Politecnico di Milano ⁹, es una alternativa viable para reducir el fenómeno de condensación en los sistemas cuya cara exterior se caracteriza por una alta resistencia al vapor.

La segunda categoría o fachada a "pantalla" es caracterizada por el mayor tamaño de las juntas horizontales (abiertas) entre los elementos del revestimiento. Este tipo de solución opera con una "ventilación más amplia dentro de la cámara de aire"¹⁰ aunque el principio no es similar al efecto chimenea. La principal diferencia en el uso de estos sistemas es la necesidad de proporcionar un acabado superficial, para la cara interna, adecuado que sea visiblemente "agradable" y directamente expuesto a los agentes climáticos.

Los diferentes tipos de pared tienen el mismo patrón de funcionamiento y puede considerarse intercambiables, por ejemplo, en principio la estructura de apoyo es la misma. La diferencia entre los varios sistemas está en el diseño de los anclajes de las placas que dependen del tipo de fachada, de sus características geométricas y del material de la placa.

⁹ (Sergio Croce, *Le facciate rivestite a secco. Problema di progettazione funzionale. Pareti ventilate: una scelta per il 2000, rivista Costruire*),

¹⁰ (Angelo Lucchini, *Le pareti ventilate; metodologia di progettazione e messa in opera di materiali e componenti*, Milano, edizioni il Sole 24 Ore, settembre 2000, pg.4),

3.4 Física de las Fachada ventilada de juntas abiertas.

En una Fachada Ventilada de juntas abiertas se dan los tres mecanismos básicos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, al igual que ocurre en un cerramiento convencional con cámara de aire estanca. Pero los flujos de calor y los balances térmicos son bastante diferentes.

En la Figura 3.18. se representan los distintos intercambios de calor en ambos tipos de pared. En el cerramiento convencional con cámara de aire sellada se establece un bucle convectivo, es decir, el aire asciende por la cara caliente (la exterior, donde incide la radiación solar) ganando calor y desciende porque esta cediendo calor a la cara fría.

En el caso de la fachada ventilada, el aire asciende a lo largo de toda la cavidad ganando calor tanto de la pared exterior (losas) como de la pared interior. Además se da un transporte de masa debido al movimiento convectivo del aire.

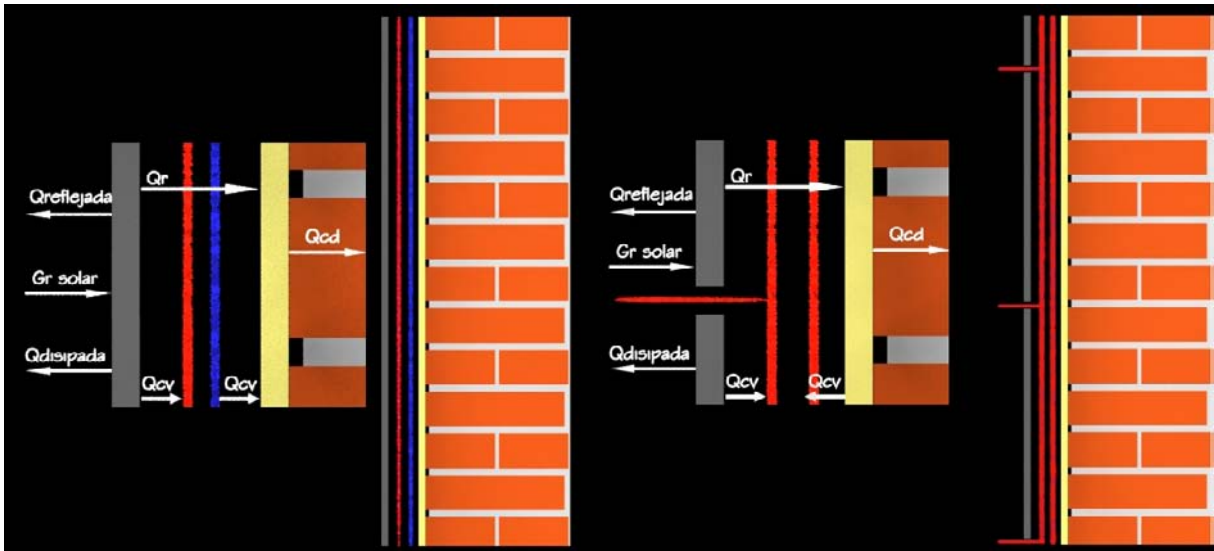


Fig. 3.18. Flujos de calor en un cerramiento convencional (izquierda) y en una Fachada ventilada de juntas abiertas (derecha).(Imagen del autor)

Si la solución del problema de la fachada con junta cerrada es bastante sencilla, de hecho, simplemente hay que resolver el equilibrio térmico en ambos lados, es decir hacer un balance entre las pérdidas de calor y la energía ganada.

En la fachada de juntas abiertas, sin embargo, no es tan fácil ya que el aire que circula a lo largo de la cavidad quita (o incrementa) calor a un ritmo desconocido, y puesto que hay convección natural, hay que resolver simultáneamente los dos conjuntos de ecuaciones: las de Navier-Stokes que rigen el movimiento del aire y la ecuación de energía para la transferencia de calor.

El balance térmico en estado estacionario es el siguiente:

$$G_{solar} = Q_{reflejada} + Q_{dissipada} + Q_{conv.L} + Q_{rad-L-P}$$

donde: G_{solar} es la media de la radiación solar incidente perpendicularmente sobre la fachada, $Q_{reflejada}$ y $Q_{disipada}$ son el calor reflejado y disipado de las losa cerámicas (L) al aire interior a la cámara, $Q_{conv.L}$ es la transferencia por convección de las losas al aire interno a la cámara y $Q_{rad.L-P}$ el calor irradiado por las losas (L) a la pared interior (P).

De la misma manera las paredes internas tienen el siguiente balance:

$$Q_{rad.L-P} = Q_{conv.P} + Q_{cond.P}$$

donde: $Q_{conv.P}$ es la transferencia por convección desde la pared interior a la cámara de aire, y $Q_{cond.P}$ la ganancia total de calor en la cámara de aire, es decir al carga térmica de la fachada.

La suma de los términos de convección, puesta en la primera ecuación representa el calor evacuado por ventilación al exterior de la fachada y por lo tanto no llega a la pared interior.

3.5 Conclusiones.

Los trabajos de investigación desarrollados hasta ahora en fachadas ventiladas muestran dos direcciones básicas: trabajo experimental y computacional. Se da el caso que las fachadas ventiladas pueden ser de distintos tipos y configuraciones, ya sea debido al tipo de material de las losas

de revestimiento, o por las dimensiones de las juntas y de la cámara de aire. Esta variedad de topología genera la existencia de dos tipos de estudios: los que tratan de encontrar expresiones generales que describan el comportamiento térmico de cierta gama de fachadas ventiladas y los trabajos específicos desarrollados por las ingenierías para evaluar fachadas particulares, normalmente empleando CFD, y que raramente son publicados en revistas científicas.

3.6 Alcance de la investigación.

De la revisión del estado del arte sobre estudios de fachadas ventiladas aparecen lagunas en cuanto a fachadas de juntas abiertas sea en campo experimental que en computacional. Con estas consideraciones se comienza el desarrollo de un modelo computacional validado experimentalmente, para la descripción térmica de una fachada ventilada de juntas abiertas.

4. Experimentación real en una fachada ventilada.

4.1 Objetivos de la monitorización.

El empleo sistemático de la monitorización es útil desde diversos puntos de vista: científico y técnico.

Desde el punto de vista científico, el planteamiento del experimento sirve para dos funciones básicas:

- Desarrollo y/o mejora de algoritmos de simulación de los distintos fenómenos térmicos que tienen lugar en el edificio.
- Validación de códigos de simulación a través de la comparación de los resultados teóricos con los datos experimentales.

Desde el punto de vista técnico sirve para desarrollar metodologías de monitorización que permitan cubrir campos tales como:

- La caracterización de edificios y de sus componentes desde el punto de vista energético. Es decir, la realización de auditorías energéticas que permitan al propietario pedir una serie de análisis para poder así exigir responsabilidades al constructor, si no se cumplen las especificaciones energéticas previstas en el edificio.

- Desarrollo de sistemas de control automático para optimizar la respuesta térmica en la integración entre los sistemas y el edificio.
- Diagnóstico de mal funcionamiento de los edificios, con el fin de realizar rehabilitaciones energéticamente eficaces.

4.2 Metodología.

Conocimiento previo.

Antes de plantear un experimento concreto, es necesario conocer las características climáticas, constructivas y geométricas al que va a estar sometido el edificio. Para ello se necesita:

- Tener datos fiables del clima de la zona (generalmente debe recurrirse al AEMET, Agencia Estatal de Meteorología).
- Realizar un examen visual de la zona con el fin de conocer el emplazamiento real del edificio y evitar aquello que pueda modificar las condiciones climáticas generales, como son: vegetación, edificios cercanos, etc..
- Disponer del proyecto de ejecución del arquitecto para extraer las medidas y composición de los parámetros constructivos.

A partir de esta información se puede construir un modelo de simulación que caracterice al edificio y/o a sus componentes, permitiendo analizar su comportamiento energético teórico durante largos periodos de tiempo.

Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad permite obtener los flujos que van a afectar al comportamiento térmico del edificio y/o sus componentes para poder plantear los experimentos y tipos de medida más adecuados, eliminando así las variables más irrelevantes del comportamiento del edificio y/o sus componentes.

En esta fase es importante disponer los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos de simulación, permitiendo analizar múltiples opciones de las características del edificio.

El análisis de sensibilidad permite:

- Optimizar el diseño, mediante la obtención de los parámetros que hacen más eficiente el comportamiento energético.
- Obtener las variables más significativas, como son:
Temperaturas, humedades relativas, radiación solar, velocidades y dirección de viento.

Diseño y ejecución del experimento.

Una vez conocido el comportamiento teórico de un componente de un edificio bajo diferentes condiciones y establecidos cuales son los flujos energéticos críticos, se define que tipo de experimentos, así como cuantas variables y con que precisión y frecuencia, deben medirse.

En condiciones normales el diseño del experimento debe resolver las siguientes cuestiones:

- Número, calidad y posición de los sensores a instalar.
- Instalación de una garita meteorológica encima del edificio, para conocer la climatología específica de la zona.
- Frecuencia de lectura y de almacenamiento de los datos.
- Qué medidas se van a almacenar (medias solamente, o también máximas, mínimas, desviación típica, etc.)

Una vez analizadas estas cuestiones se instalan los sensores y se pone en marcha la campaña de medidas ejecutando los experimentos prediseñados. El almacenamiento de los datos de forma racional es crítico para una correcta evaluación posterior.

Análisis de los datos experimentales.

El primer paso a seguir para analizar los datos registrados es una depuración de los mismos, eliminando los erróneos y, siempre que sea posible, rellenando los huecos de modo que consigamos series temporales lo más largas posibles.

El siguiente paso es identificar las variables de entrada del sistema para determinar las variables de salida que caracterizarán el comportamiento energético de la componente analizada.

Este análisis nos debe proporcionar datos no sólo de la evolución del sistema durante el periodo de monitorización, sino que debe ser capaz de poder extrapolar conclusiones sobre el comportamiento futuro y sobre la caracterización energética del mismo.

Modelos para el estudio experimental.

Existen dos tipos de métodos diferentes tanto en el procedimiento de análisis como en los resultados obtenidos.

1- Modelos estáticos.

Los modelos estáticos no proporcionan un conocimiento exhaustivo ni de las características del edificio ni de su funcionamiento, pero nos permiten extraer información fiable del comportamiento del sistema. Estos modelos se

basan en el comportamiento medio del sistema, eliminando, de este modo, la parte dinámica de los fenómenos térmicos.

Este tipo de modelos permite calcular el coeficiente global de pérdidas efectivo y la apertura solar efectiva a partir de la medida de la radiación solar y de las temperaturas en el interior y el exterior. Con ello se puede establecer una estimación de la calidad constructiva (UA) y de la calidad de diseño pasivo en cuanto al aprovechamiento de energía solar (As).

2- Modelos dinámicos.

Estos modelos permiten analizar el comportamiento energético del edificio de manera más exhaustiva, pero necesitan muchos más datos de entrada. Son, por lo tanto, métodos más completos pero más complejos.

Esta metodología es más dinámica ya que permite la relación entre cada una de las variables mediante el análisis de series temporales. Es especialmente útil en condiciones de evolución libre del edificio, eliminando el comportamiento del propio usuario, lo que permite hacer una caracterización energética del edificio independientemente del buen o mal uso del mismo.

4.3 Planteamiento de la monitorización.

De la revisión bibliografía se destaca la ausencia de estudios experimentales sobre fachadas ventiladas de juntas abiertas. Para el desarrollo de la parte experimental de esta memoria se ha utilizado los ficheros de datos disponibles de la monitorización de la fachada ventilada de juntas abiertas del

edificio CIESOL (Figura 4.1., 4.2. y 4.3.), ubicado en la Universidad de Almería. Este edificio es uno de los cinco contenedores-demostradores de investigación dentro del Proyecto Singular Estratégico de Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL) que se está desarrollando y coordinando por la UiE3 del CIEMAT.

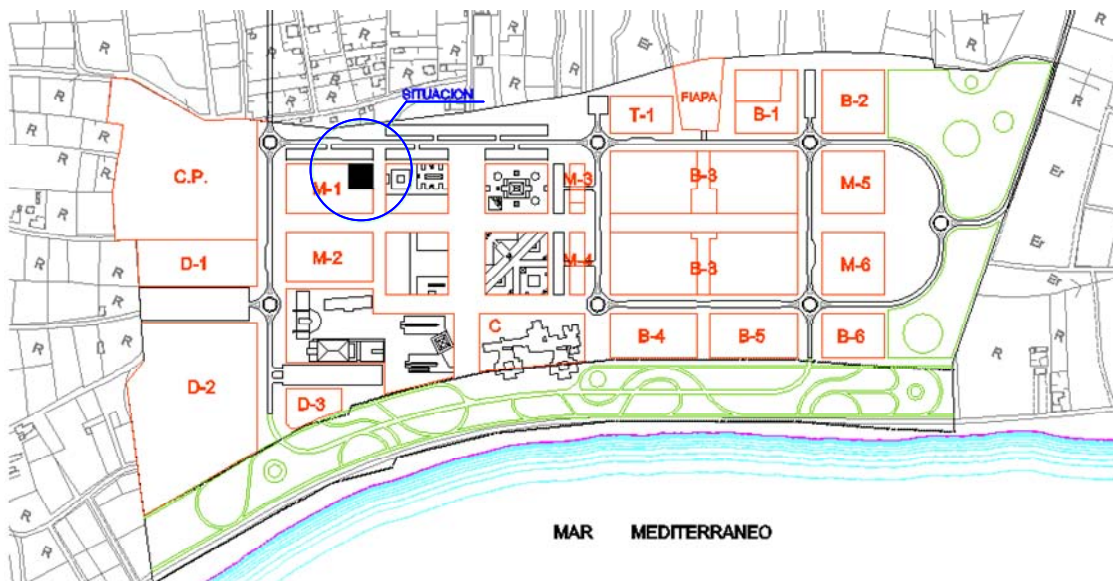


Fig. 4.1. Plano de la situación del edificio CIESOL de la Universidad de Almería. (Libro del Edificio, Arq. J. Torres Orozco)



Fig. 4.2. Vista fachadas Norte-Este del edificio CIESOL de la Universidad de Almería. (Imagen A. Bosqued)



Fig. 4.3. Vista fachada Sur-Este del edificio CIESOL de la Universidad de Almería. (Imagen A. Bosqued)

Descripción del Edificio y de la Fachada monitorizada

Se trata de un edificio de dos plantas, cuyos planos pueden verse en las Figura 4.4. y la Figura 4.5., se distinguen las siguientes zonas:

- Oficinas en la zona este de cada una de las plantas.
- Laboratorios en la zona norte de la planta baja.
- Laboratorios en la zona norte de la planta alta.
- Nave taller en la zona sur de la planta baja.
- Otras dependencias: Pasillos, servicios, almacenes, vestíbulos, escaleras.

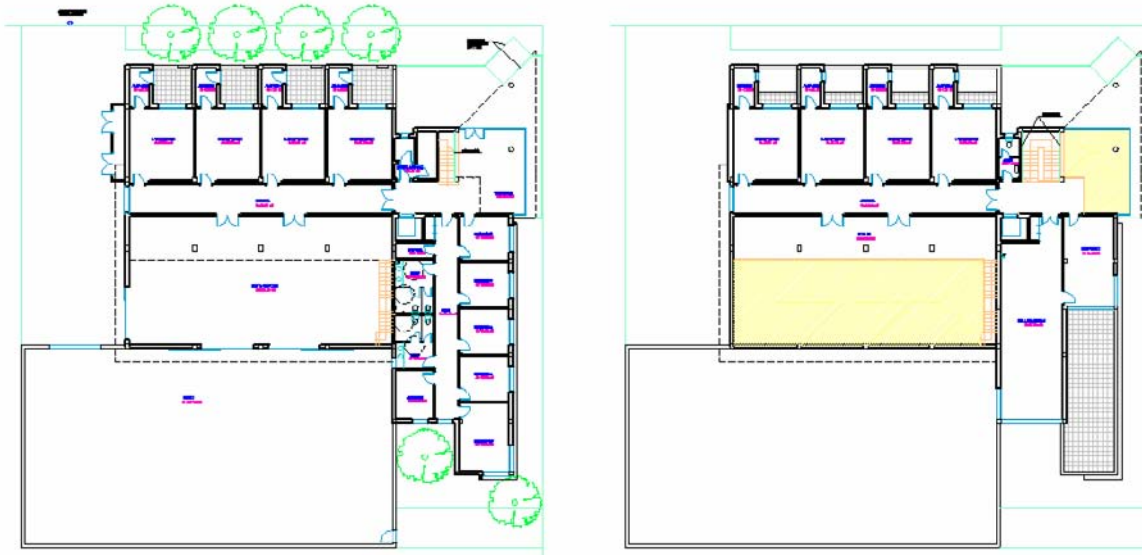


Fig. 4.4. Plantas del edificio CIESOL de la Universidad de Almería. (Libro del Edificio, Arq. J. Torres Orozco)

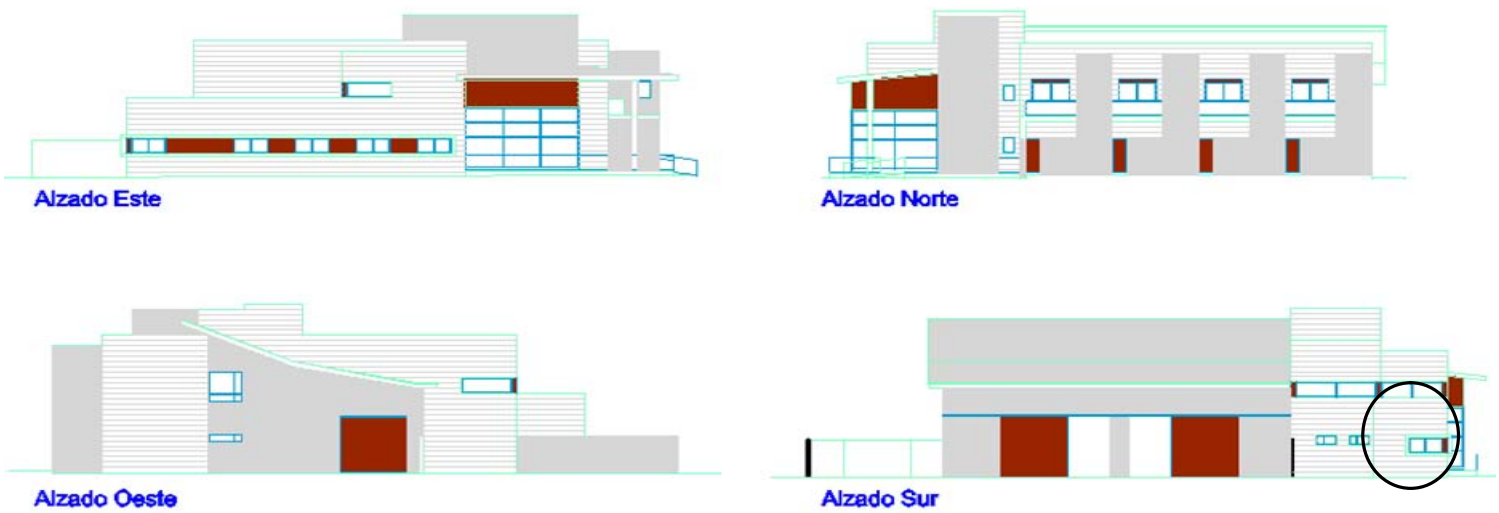


Fig. 4.5. Alzados del edificio CIESOL de la Universidad de Almería. (Libro del Edificio, Arq. J. Torres Orozco)

Todos los laboratorios tienen orientación norte, mientras que la zona administrativa y de despachos tienen orientación este, ambas están comunicadas con la nave-taller, y el patio de experimentación situados en la zona central y orientados al sur.

El cerramiento de la fachada norte, está compuesto por chapa exterior metálica, aislamiento, un bloque de termoarcilla de mayor aislamiento térmico que los materiales de uso habituales.

El cerramiento general del edificio, objeto de esta memoria, consiste en una fachada ventilada con orientación sur, con revestimiento exterior cerámico (modelo Ston-Ker de Porcelanosa), cámara de aire, aislamiento de poliuretano y un muro interior de alta inercia térmica, en Figura 4.6. (a y b) se muestra el sistema constructivo con las distintas capas.

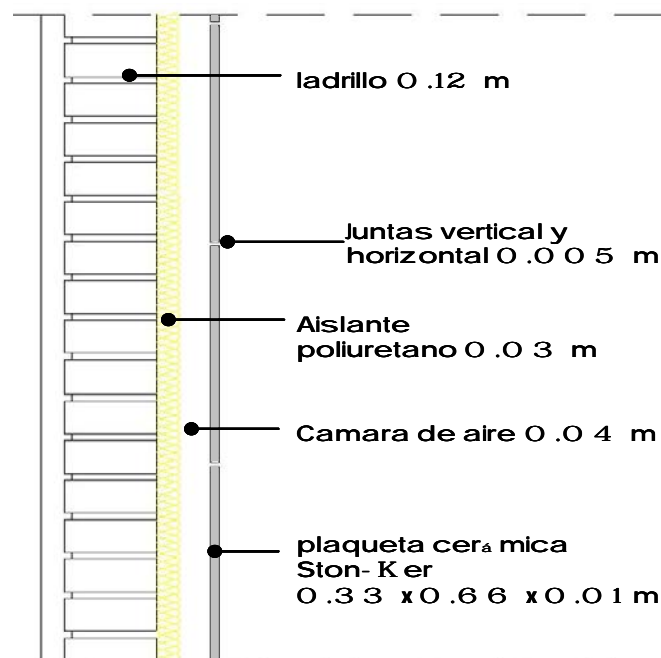


Fig. 4.6a. Fachada ventilada de juntas abiertas Ston-ker, Porcelanosa. (Imagen del autor)



Fig. 4.6b. Fachada ventilada de juntas abiertas Ston-ker, Porcelanosa. (Imagen A. Bosqued)

Metodología experimental

La metodología que se ha adoptado en la monitorización de esta fachada ventilada ha sido desarrollada con el grupo de trabajo de la Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación (UiE3) del CIEMAT en el ámbito del PSE-ARFRISOL. Esta metodología implica el registro, con la frecuencia y el almacenamiento escogido, de las variables deseadas. Se ha definido el número y tipo de canales y la recogida de sus datos.

Diseño experimental

En el diseño experimental se han considerado tanto los requerimientos derivados de cada uno de los objetivos planteados en la monitorización, como las características de la fachada.

Puntos de medida

En la Tabla 4.1. se resumen las magnitudes y sensores que se han elegidos y en las Figuras 4.7a. y b. se pueden ver los varios niveles de puntos de medida y la altura total de la fachada como la de la zona de monitorización evidenciada en morado. Algunos de estos puntos se refieren a varios sensores colocados a través de la fachada, como se indica más detalladamente en la Figura 4.8.. A continuación se exponen los criterios aplicados para la selección de los mismos.

Las necesidades derivadas del análisis dinámico son más exigentes en cuanto a magnitudes a medir, puntos de medida, y exactitud de las mismas, por lo que se cuidó especialmente la selección de equipos de medida que cumplieran estos requerimientos.

Aunque esta metodología ya ha sido aplicada con éxito para la estimación de UA y gA de cerramientos (Heras y col. 2005), debe tenerse en cuenta que se encuentra en fase de investigación. Por ello además de las medidas utilizadas en los trabajos publicados en la actualidad, se han considerado medidas adicionales cuyo efecto respecto a la mejora de los modelos y parámetros obtenidos ya ha sido demostrado con el análisis de

algunos ensayos a nivel de componente como es el caso de la velocidad de viento y de la radiación infrarroja (Jimenez y Madsen, 2005).



Fig. 4.7a. Puntos de medidas, niveles en la fachada ventilada de juntas abierta del edificio CIESOL. (Imagen del autor)



Fig. 4.7b. Altura (m) total y de la parte monitorizada de la fachada ventilada de juntas abierta del edificio CIESOL. (Imagen del autor)

Siendo la fachada ventilada, un componente singular, construido para mejorar el comportamiento térmico del edificio, y de funcionamiento complejo, para su estudio se han medido:

- temperaturas en diferentes planos y a diferentes alturas,
- densidad de flujo térmico en diferentes planos y a diferentes alturas,
- velocidad de viento en el interior de la cavidad a diferentes alturas,
- radiación global e infrarroja sobre la superficie exterior de la fachada,
- velocidad y dirección de viento frente y próximas a la fachada.
- también se ha colocado un conjunto de sensores de temperatura distribuidos en el interior de la cavidad para determinar si el flujo de aire es laminar o turbulento.
-

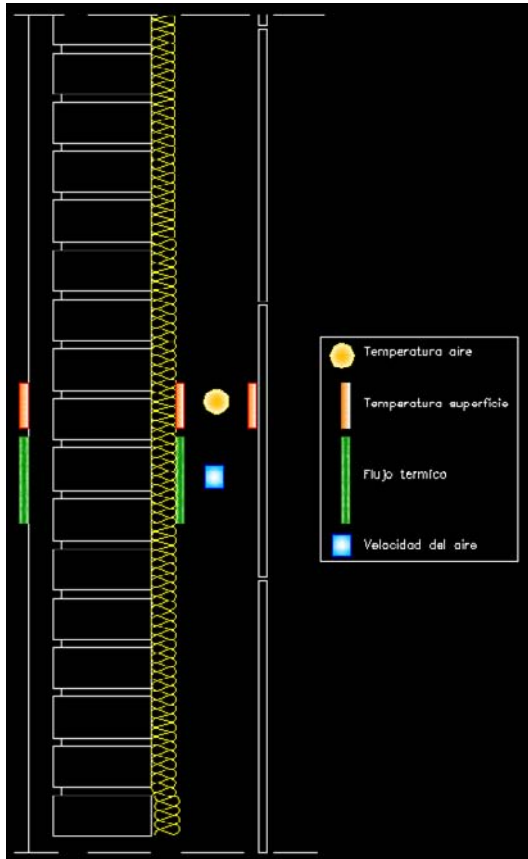


Fig. 4.8. Puntos de medidas a través de la fachada ventilada de juntas abierta del edificio CIESOL. (Imagen del autor)

4.4 Sensores

En la Tabla 4.1. se especifican las variables medidas, el número, el tipo, la exactitud, el modelo y la marca, de los sensores de la monitorización de la fachada ventilada, así como de la estación meteorológica del edificio del CIESOL.

4.5 Frecuencia de lectura y registro

Todos los canales se han leído cada segundo, y se han registrado promedios cada segundo, cada 10 minutos, cada día, cada semana y cada mes.

La campaña de medidas tomada en consideración por el análisis ha sido de 1 año.

4.6 Sistema de adquisición de datos

Se ha utilizado un sistema de adquisición de datos modular, distribuido y ampliable, compuesto por módulos Fieldpoint de NATIONAL INSTRUMENTS, gestionados mediante una aplicación desarrollada en LabVIEW, por el personal de la UIE3 del CIEMAT.

La comunicación entre módulos se ha hecho mediante red Ethernet, y se ha permitido el acceso remoto a las medidas.

Se ha minimizado la distancia entre cada uno de los puntos de medida y el módulo de adquisición de datos correspondiente para minimizar errores.

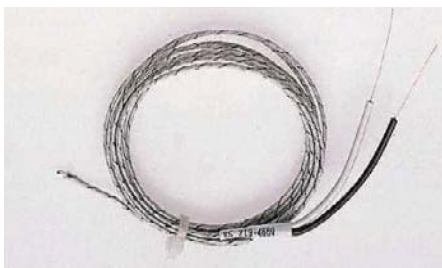


Fig. 4.9. Sensor PT100. (Manual fabricante)



Fig. 4.10. Sensor Termopar. (Manual fabricante)



Fig. 4.11. Sensor velocidad y dirección de viento. (Manual fabricante)



Fig. 4.12. Sensor radiación infrarroja. (Manual fabricante)

Tabla 4.1: Sensores para monitorización de fachada ventilada

ESTUDIO DE FACHADA VENTILADA								
Medida	Localizacion	Total	Rango	Tipo	Marca	Modelo	Salida	Cantidad
Temperatura de aire interior	6 alturas en la cavidad	6	-20..70°C	Termopar tipo T	TC Medida y Control	401-909	-5..5mV	14
	8 celdas en la cavidad	8						
Temperatura de aire exterior	Exterior fachada	1	-20..70°C	PT100, clase A	Vaisala		100..138.5 ?	1
Flujo térmico	6 alturas cara interior del muro	6	-50..50W/m²		Hukseflux	HFP01	0..1 mV	12
	6 alturas cara exterior del muro	6						
Temperatura superficie	6 alturas interior de fachada cerámica	6	-20..70°C	PT100, clase 1/10	TC Medida y Control	16-1-3.0-4-20-CE2L-R100-1/10-5MTRS RF47	100..138.5 ?	18
	6 alturas cara interior del muro	6						
	6 alturas cara exterior del muro	6						
Velocidad de viento canal interior	3 alturas fachada ventilada	3	0..5m/s	Hilo caliente	TSI/TESTO	8475	4..20 mA	3
Velocidad y dirección de viento	Exterior de la fachada	1		Sónico, biaxial	Gill Instruments	WinSonic	4..20 mA	1
Radiación infrarroja	Superficie exterior de la fachada ventilada	1			Eppley	PIR y VENT	0..15mV	1

Tabla 4.2: Sensores para monitorización de variables meteorológicas

MEDIDAS METEOROLOGICAS								
Medida	Localizacion	Total	Rango	Tipo	Marca	Modelo	Salida	Cantidad
Radiación Global	Garita azotea horizontal	1			Kip&Zonen	CM11	0.15mV	4
	Garita azotea vertical	1						
	1 por Plano de captadores	2						
Radiación infrarroja horizontal	Garita azotea	1			Eppley	PIR y VENT	0.15 mV	1
Temperatura de aire	Garita azotea	1	-20..70°C		VAISALA		100..138.5 ?	1
Humedad relativa	Garita azotea	1	0..100%		VAISALA	HMP 233	0..1V	1
Velocidad y dirección de viento	Garita azotea	1	0..50m/s y 0..360º	Sónico, biaxial	Gill Instruments	WinSonic	4..20 mA	1
Pluviómetro	Garita azotea	1			GEONICA	52202 y SPL-5200	Interruptor magnetico	1
Temperatura de aire	1 proximo a cada fachada	4	-20..70°C				100..138.5 ?	4

4.7 Análisis de los resultados

Los resultados experimentales mostrados por la fachada ventilada de juntas abierta del CIESOL, corresponden al día tipo, es decir, al día más representativo de un periodo de invierno y uno de verano. El cálculo de tales días se realiza en función de la serie completa de las variables meteorológicas disponibles (en este caso temperatura exterior). Esta tecnología tiene en cuenta la diferencia entre los valores horarios y la media obtenida durante ese periodo. Además de estos se puso como otro requisito que las velocidades del viento no fueran mayores de 2 m/s.

Con la serie de datos disponibles se realizan los cálculos para encontrar el día tipo del periodo de verano, dando como resultado el 24 de Julio de 2008. Mientras que el día tipo de invierno resultó ser el 12 de Febrero de 2009.

Los datos meteorológicos se obtienen de una garita meteorológica que se encuentra en el edificio, Tabla 4.2..

Los datos meteorológicos que se observan en las Figuras 4.13. y 4.14. muestran la radiación solar vertical sobre la fachada que supera lo 400 W / m^2 , valor no muy alto debido a la gran altura que alcanza el sol sobre el horizonte en verano. Se nota un pico negativo debido probablemente a unas sombras generadas por los edificios de alrededor. La temperatura ambiente registra lo $32 \text{ }^\circ\text{C}$ más o menos tres horas después de alcanzar el máximo de radiación solar. Durante el día la velocidad de viento aumenta, a la vez que su dirección. Se alcanzan valores de velocidad de 1,34 m/s en la hora de máxima

temperatura ambiente. Estos datos se mantienen estables a lo largo de toda la semana como se puede ver en la Figura 4.15. y 4.16..

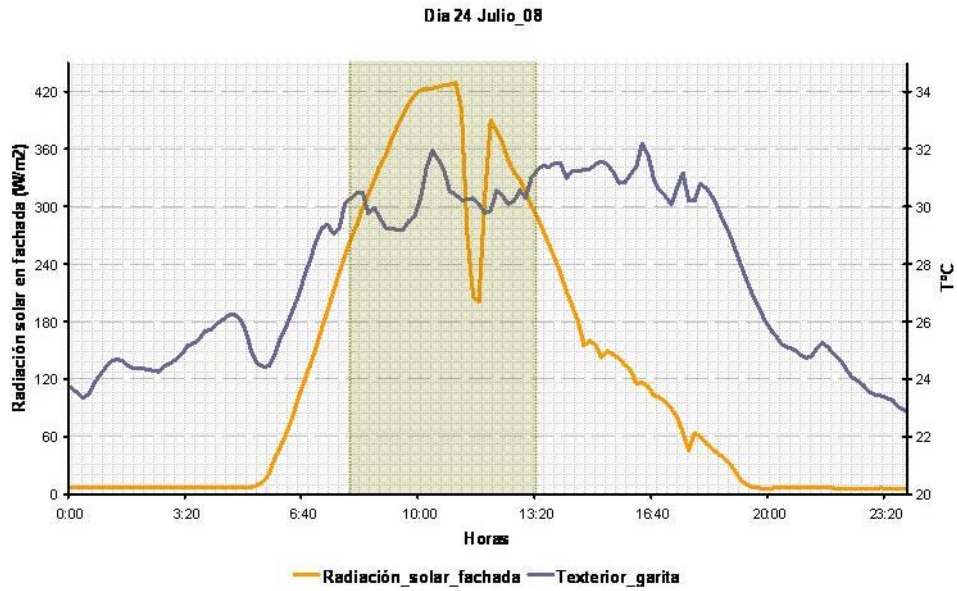


Fig. 4.13. Radiación solar global sobre superficie vertical en fachada y temperatura ambiente del día tipo de verano considerado en la monitorización.

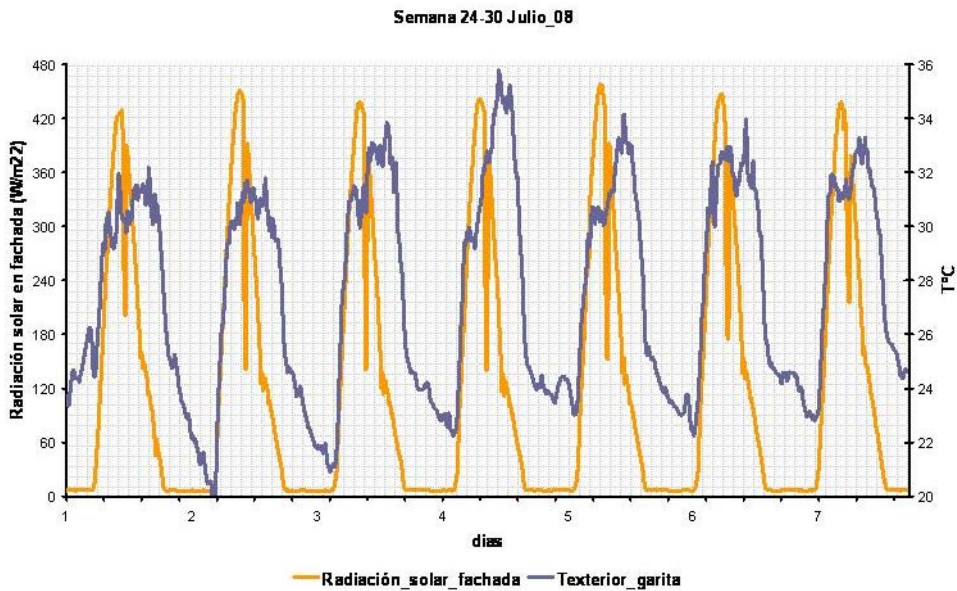


Fig. 4.14. Radiación solar global sobre superficie vertical en fachada y temperatura ambiente de una semana de verano del periodo de monitorización.

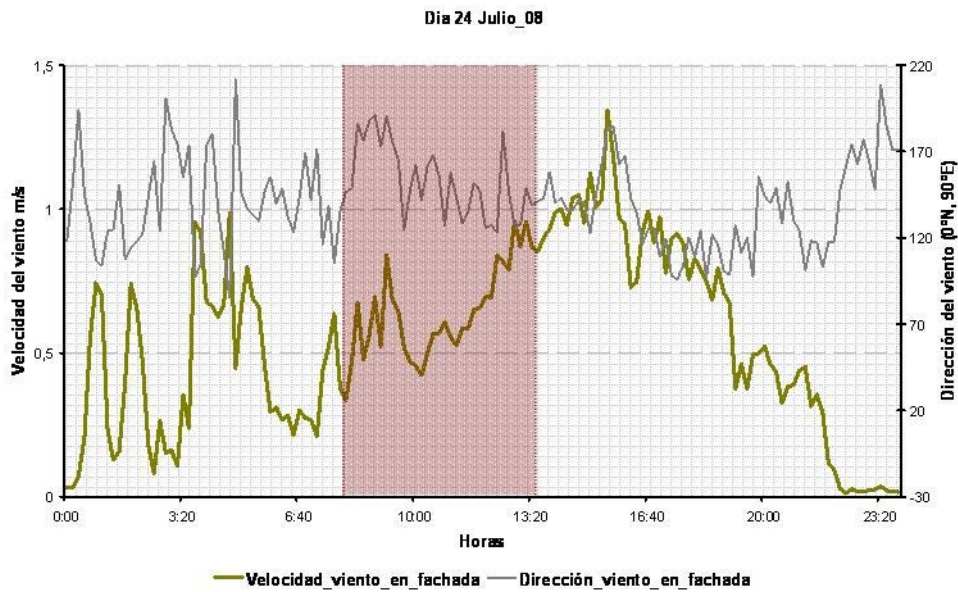


Fig. 4.15. Velocidad del viento y dirección del viento del día tipo de verano del periodo de monitorización.

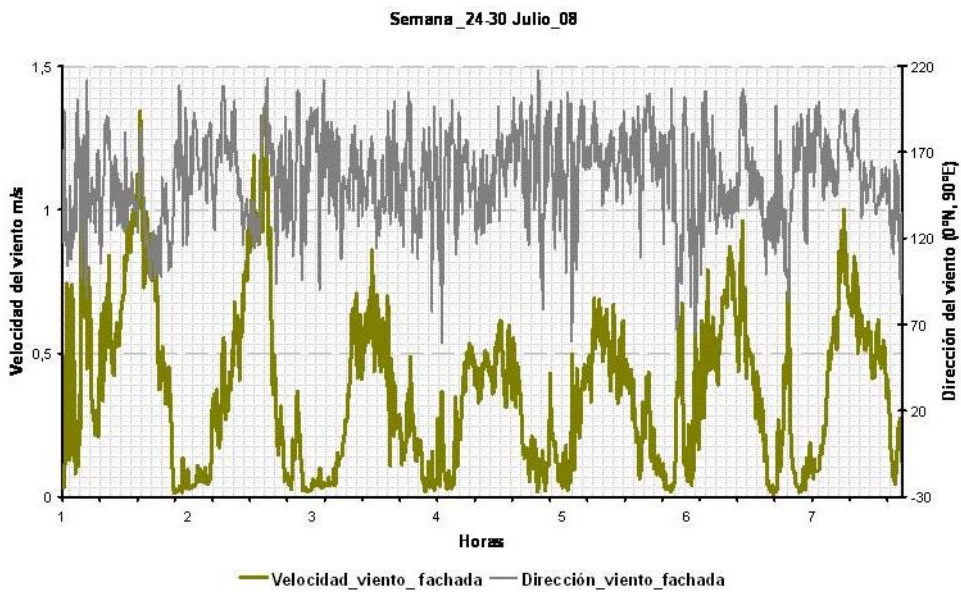


Fig. 4.16. Velocidad del viento y dirección del viento de una semana de verano considerado en la monitorización.

Los resultados experimentales obtenidos en la monitorización, se muestran siempre junto a la evolución de la temperatura ambiente y radiación solar en fachada, Figuras 4.17., 4.18., 4.19.. La tendencia que se espera del sistema de fachadas ventiladas de juntas abiertas es de alcanzar sus máximas temperaturas a la altura máxima.

En el caso del revestimiento exterior, en las plaquetas cerámicas, se nota una tendencia inversa, las temperaturas máximas se alcanzan en el primero nivel de plaquetas esto es debido, probablemente, a la radiación por reflexión que recibe del suelo, siendo esto de grava blanca y entonces con alto poder reflectante. También se observa que las plaquetas no tienen inercia térmica apreciable, ya que su temperatura evoluciona de forma paralela a la temperatura ambiente, señalada en la Figura 4.17..

La medidas de la temperatura del fluido, Figura 4.18., muestra el gradiente vertical de las temperaturas en el centro del canal, se nota que aquí si se produce un aumento de la temperatura en relación con la altura.

Se observa en Figura 4.19. que el muro de la pared interior, construido de ladrillo de 1/2 pie, tiene un aumento de las temperaturas a la mitad de la pared, en realidad los PT100 están posicionados arriba del aislante, y probablemente esto está afectando la medidas.

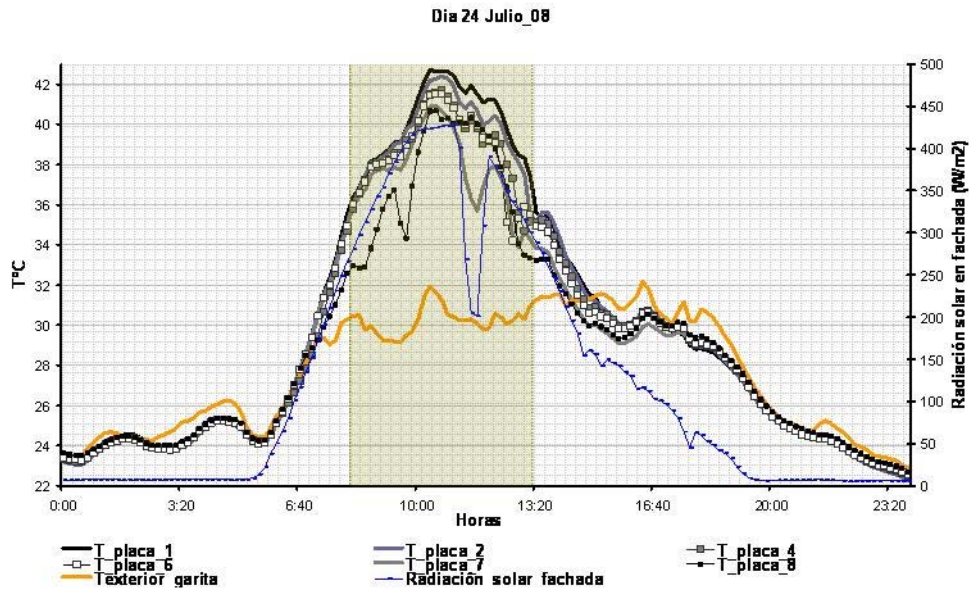


Fig. 4.17. Temperaturas de las plaquetas del día tipo de verano considerado en la monitorización.

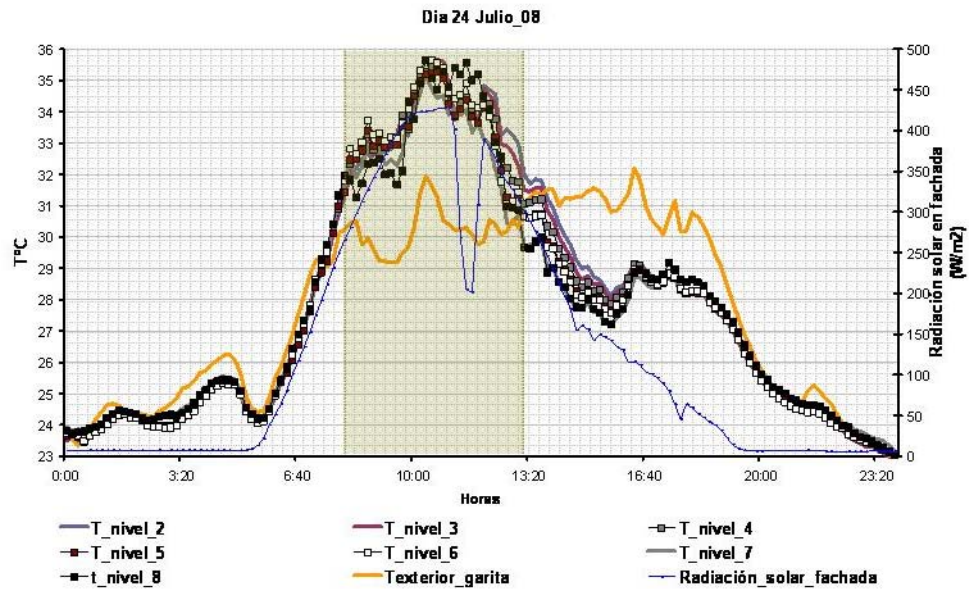


Fig. 4.18. Temperaturas del canal de aire del día tipo de verano considerado en la monitorización.

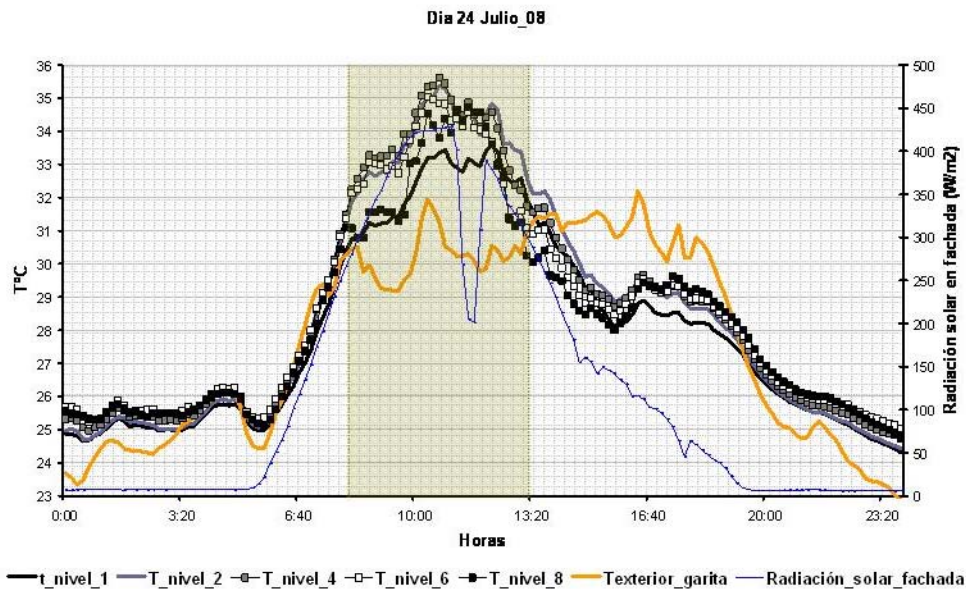


Fig. 4.19. Temperaturas de la pared interior del día tipo de verano considerado en la monitorización.

Se estiman también los perfiles horizontales de temperaturas del sistema entero a distintas alturas o niveles, nivel 2 a 70 cm del suelo, nivel 4 a 150 cm del suelo y al final nivel 8 a 300 cm del suelo. Se observa que los perfiles del primer y segundo nivel son similares y varían menos de un grado, mientras que el nivel 8 tiene un cambio en las temperaturas de las plaquetas que van disminuyendo como también las del muro, mientras que las temperaturas del canal como se esperaba van poco a poco incrementándose.

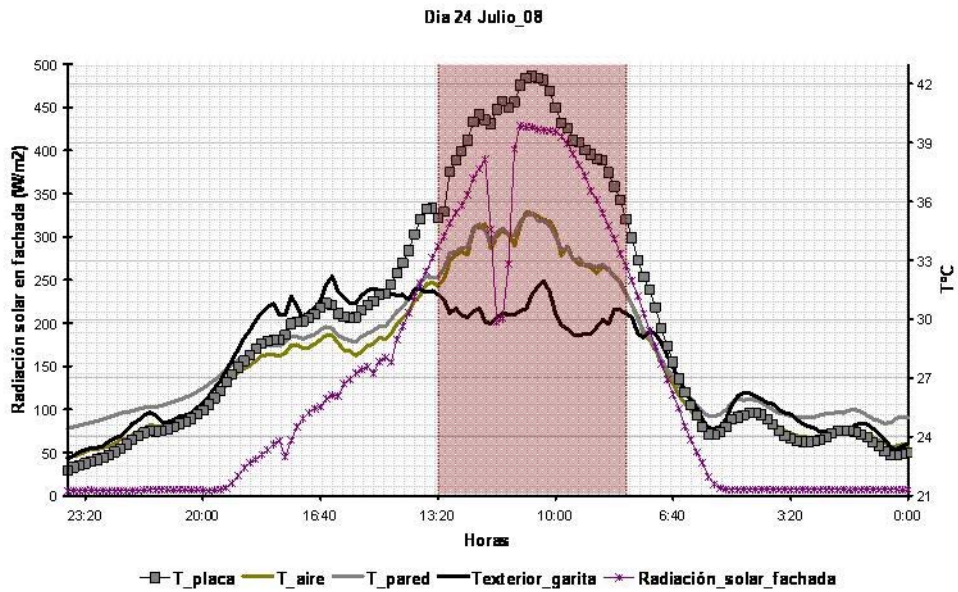


Fig. 4.20. Perfil horizontal de las temperaturas de la fachada. Nivel 2 del día tipo de verano considerado en la monitorización

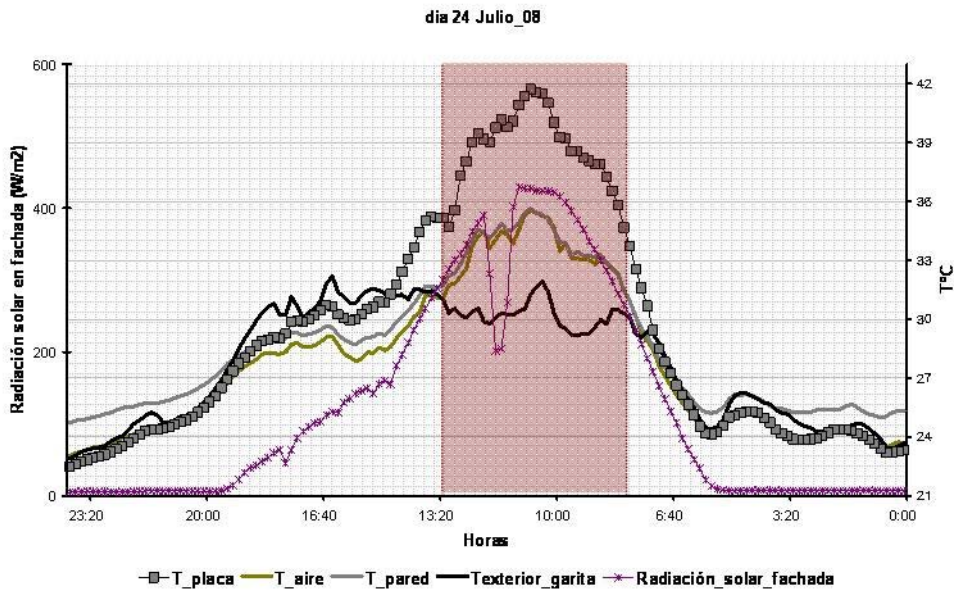


Fig. 4.21. Perfil horizontal de las temperaturas de la fachada. Nivel 4 del día tipo de verano considerado en la monitorización

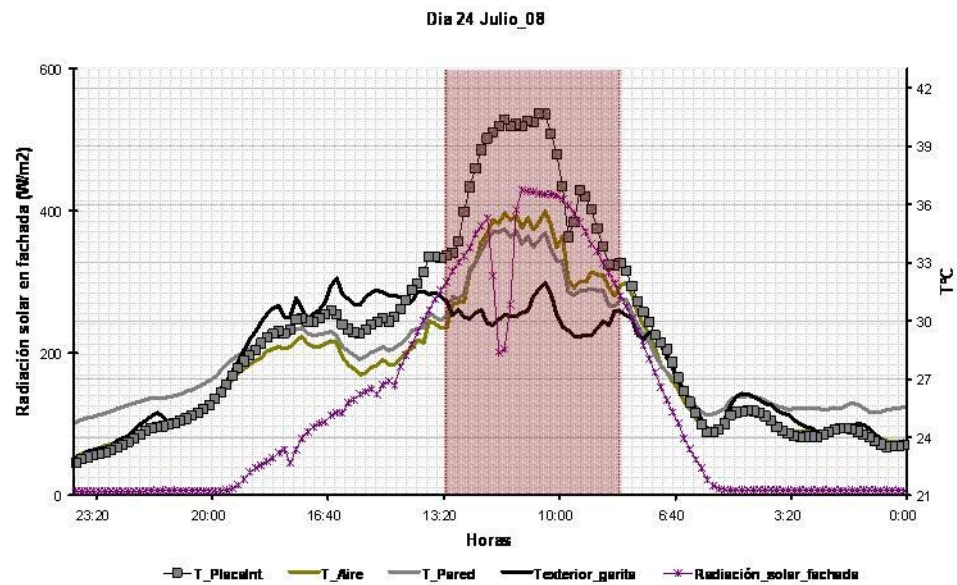


Fig. 4.22. Perfil horizontal de las temperaturas de la fachada. Nivel 8 del día tipo de verano considerado en la monitorización

Los resultados que aquí se presentan corresponden al día 12 de Febrero de 2009, siendo este el día tipo de invierno. En este caso también se ha puesto atención en el cálculo del día tipo a las velocidades del viento que, como se puede ver en la Figuras 4.25. y 4.26., son muy bajas y no alcanzan picos de 1 m/s.

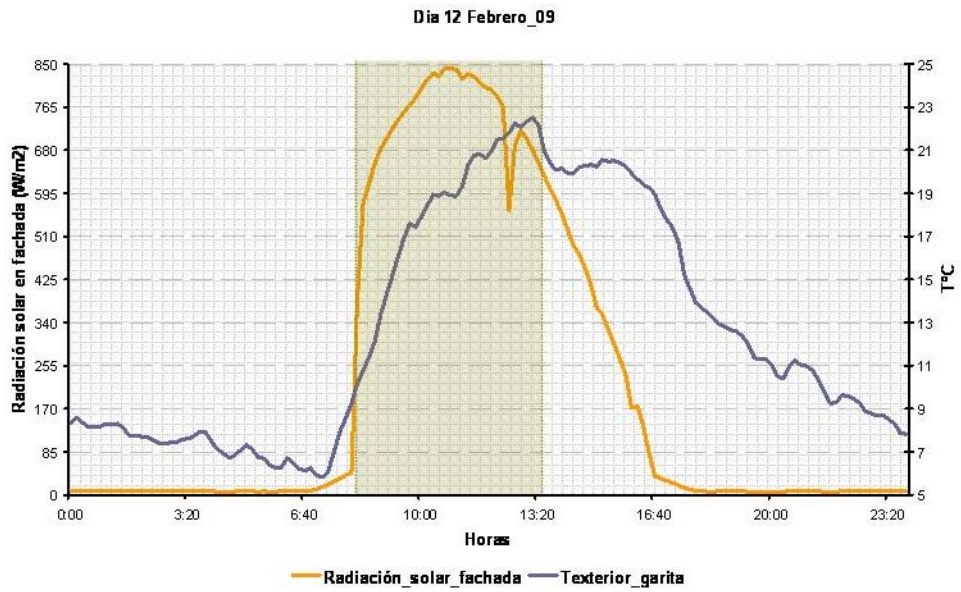


Fig. 4.23. Radiación solar global sobre superficie vertical de la fachada y temperatura ambiente del día tipo de invierno considerado en la monitorización.

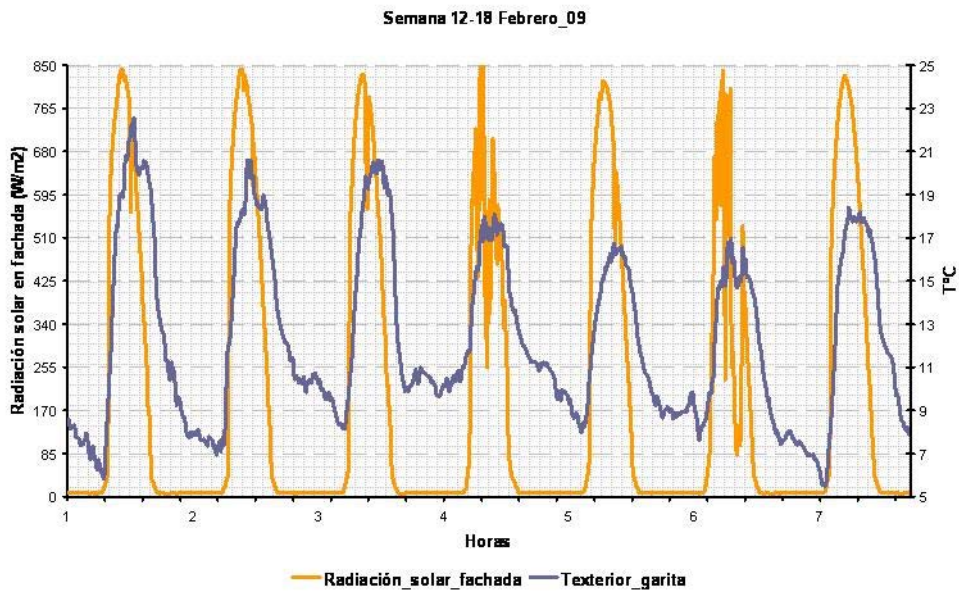


Fig. 4.24. Radiación solar global sobre superficie vertical en fachada y temperatura ambiente de una semana de invierno del periodo de monitorización.

Se observa en los otros datos meteorológicos representados en las Figuras 4.23. y 4.24. que se trata de un día claro sin nubes, la radiación solar vertical sobre la fachada alcanza los 842 W/m^2 . Este valor es superior al alcanzado en el día tipo de verano (Figura 4.13.) debido a que la altura que alcanza el sol sobre el horizonte en invierno es menor, y por tanto el ángulo de incidencia sobre una superficie vertical es menor. Los valores climáticos también en este caso se mantienen estables, como puede verse de las evoluciones a lo largo de una semana entera (Figuras 4.24. y 4.26.).

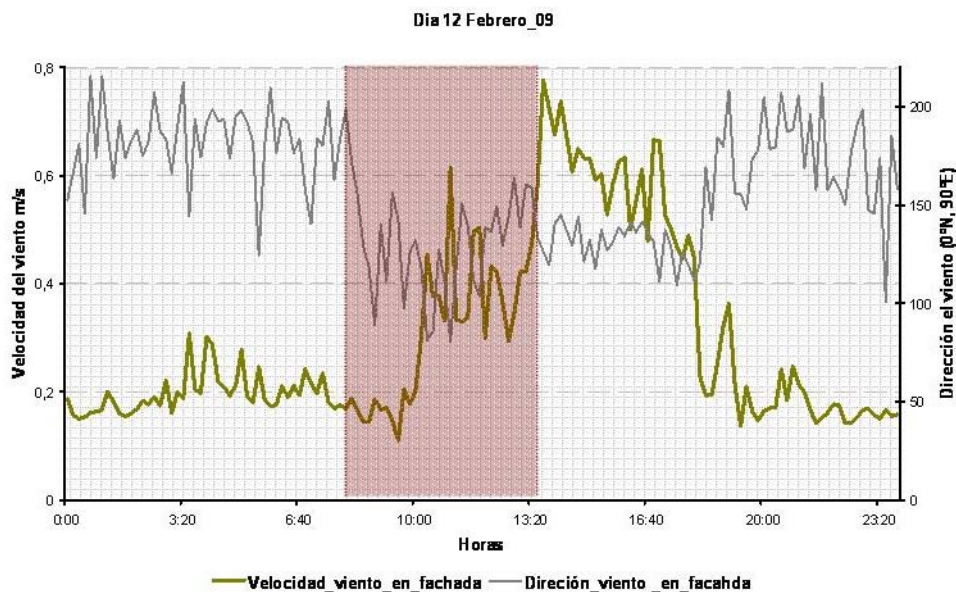


Fig. 4.25. Velocidad del viento y dirección del viento del día tipo de invierno considerado en la monitorización.

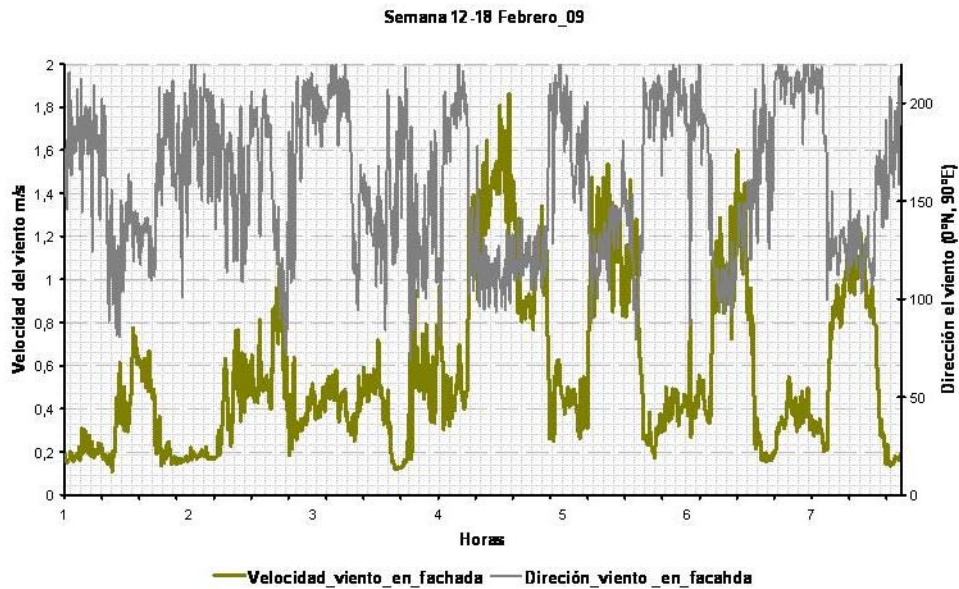


Fig. 4.26. Velocidad del viento y dirección del viento de una semana de invierno considerado en la monitorización.

La evolución de las temperaturas en las plaquetas para el día tipo de invierno (Figura 4.23.) es mucho mas parecida al esperado, dado que aumenta con la altura, además va aumentando con el aumento de la temperatura exterior, aunque con valores mucho más elevados que coinciden con los valores de la radiación solar en la fachada.

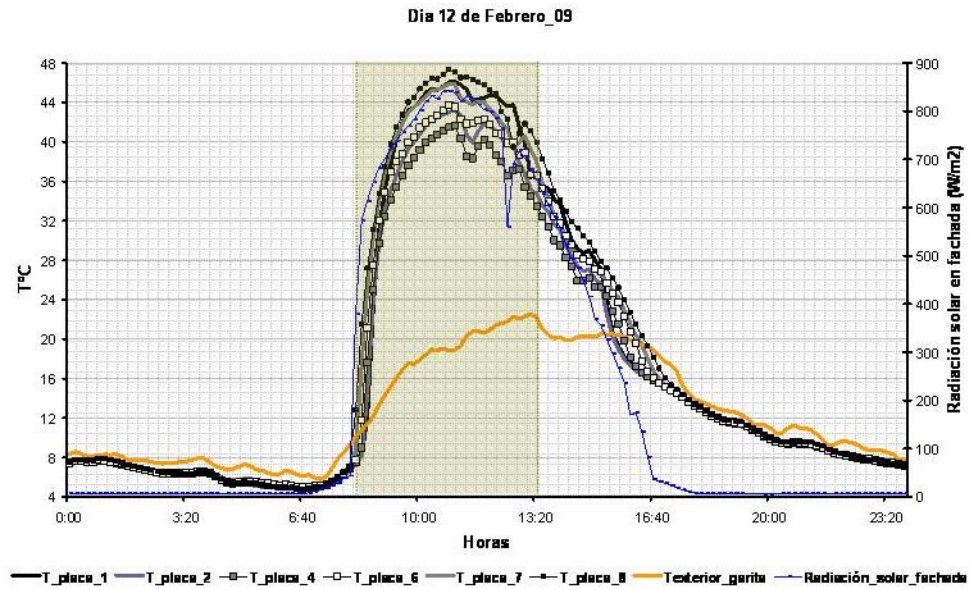


Fig. 4.27. Temperaturas de las plaquetas del día tipo de invierno considerado en la monitorización.

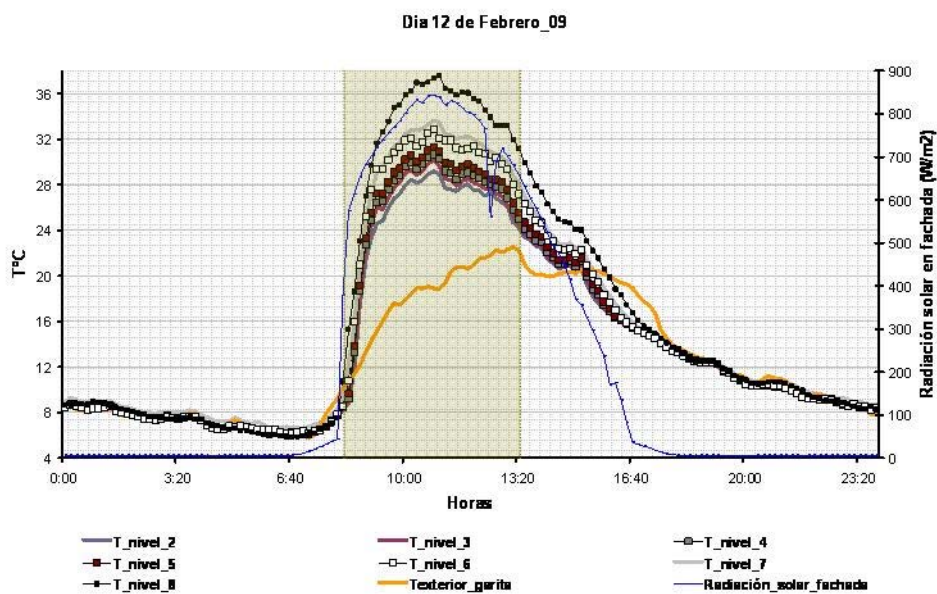


Fig. 4.28. Temperaturas del canal de aire del día tipo de invierno considerado en la monitorización.

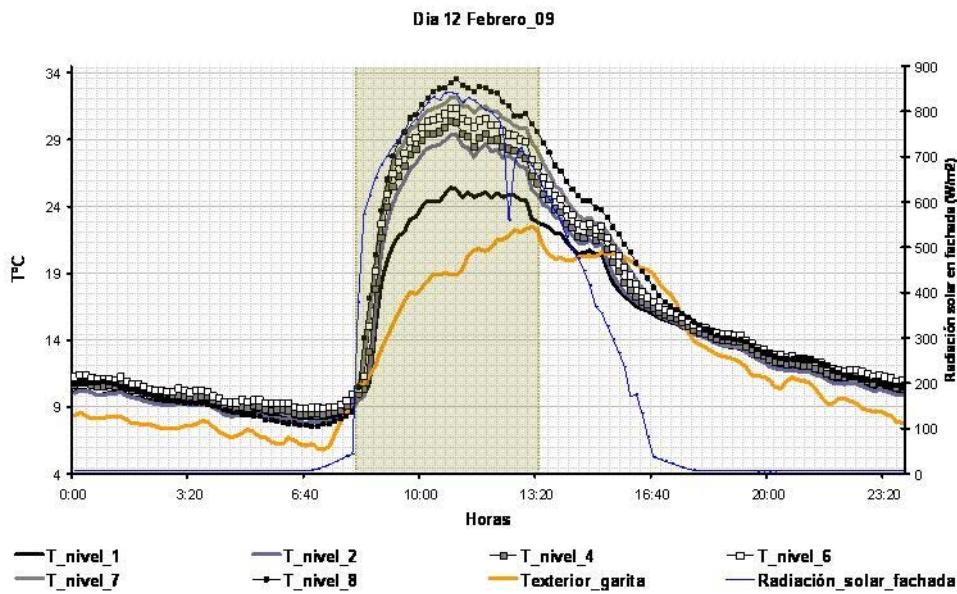


Fig. 4.29. Temperaturas de la pared interior del día tipo de invierno considerado en la monitorización.

En la pared interior, el hecho de que las temperaturas estén siempre por encima de la temperatura ambiente, y que incluso por la noche mantengan una diferencia de temperatura notable, muestra la capacidad de acumular energía térmica en el muro, y su dificultad para cederla. (Figura 4.29.).

Las Figuras 4.30., 4.31., 4.32. representan la evolución horizontal de las temperaturas de la fachada, aquí se aprecia que con el aumento de las alturas suben notablemente las temperaturas en todas las capas.

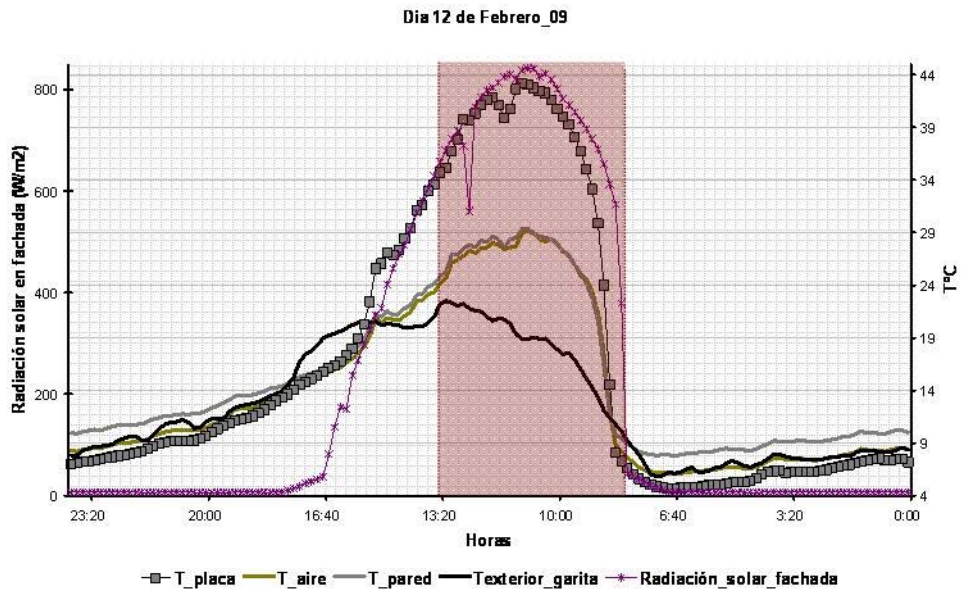


Fig. 4.30. Perfil horizontal de temperaturas de la fachada. Nivel 2 del día tipo de invierno considerado en la monitorización

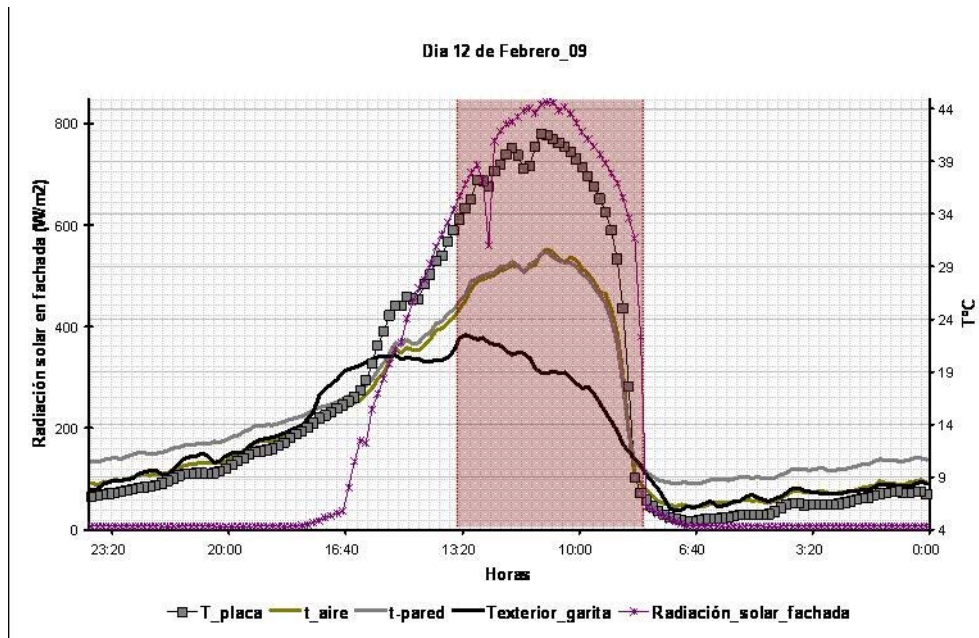


Fig. 4.31. Perfil horizontal de temperaturas de la fachada. Nivel 4 del día tipo de invierno considerado en la monitorización

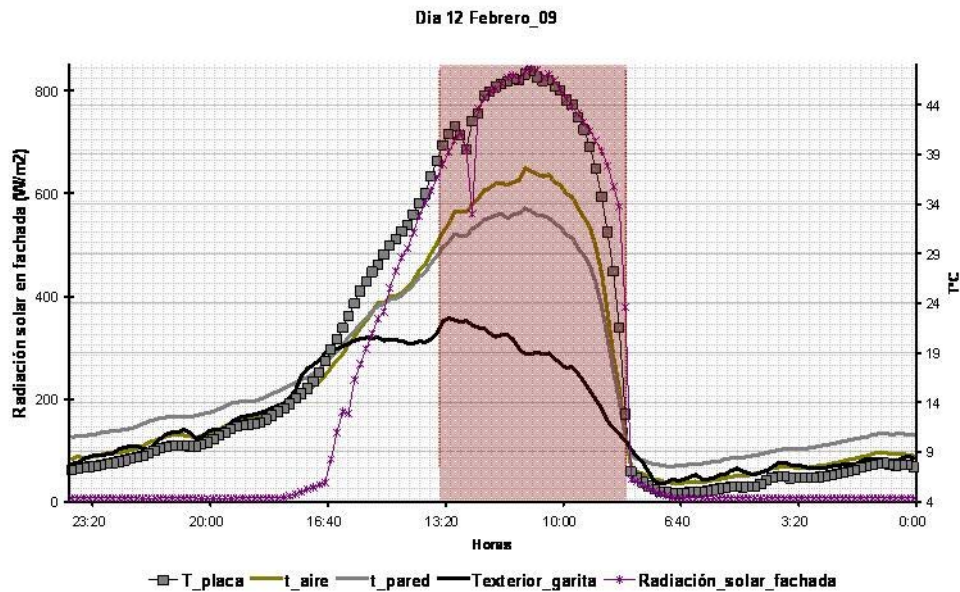


Fig. 4.32. Perfil horizontal de temperaturas de la fachada. Nivel 8 del día tipo de invierno considerado en la monitorización

El análisis de estos datos experimentales ha servido para poder estudiar el singular comportamiento de esta fachada ventilada de juntas abiertas; y así evaluar los fenómenos que afectan su comportamiento, tal como son la radiación solar incidente en fachada, el ángulo de incidencia, la absorción y la reflectividad del material de revestimiento (placas cerámicas), además de la radiación reflejada por parte del terreno y de tener en consideración que la junta de dilatación a este nivel está parcialmente cerrada debido a que el suelo es de tipo grava.

Con estas consideraciones se comienza el desarrollo de un modelo computacional que consiga describir el comportamiento energético de la fachada ventilada de juntas abiertas objeto de la monitorización.

5. Modelización fluidodinamica de una fachada ventilada de juntas abiertas.

En este capítulo se muestra la aplicación de los métodos numéricos al campo de las fachadas y, más concretamente, al estudio de fachadas ventiladas de juntas abiertas. En el Anexo I se exponen los principios básicos de los métodos numéricos aplicados a la Mecánica de Fluidos, así como los procedimientos más importantes desarrollados en el marco de dicha herramienta de cálculo.

Inicialmente se hace una breve introducción a las distintas técnicas numéricas utilizadas habitualmente en el campo de las fachadas. Se revisan después las posibilidades en cuanto a generación de mallados, modelos de turbulencia de uso frecuente, etc. y, para finalizar, se expone el método utilizado en este trabajo, describiendo tanto el modelo numérico utilizado como las distintas condiciones de contorno y discretizaciones empleadas.

5.1. Introducción.

La descripción térmica de fachadas ventiladas a través de modelos matemáticos tiene interés propio como herramienta de evaluación y diseño de estos sistemas para integrarlo en la edificación.

Por estos motivos el objetivo de los modelos conlleva simplificaciones y aproximaciones que hagan validos los modelos para diferentes tipos de la

misma. Los modelos de simulación tratan de deducir ecuaciones conjugando los datos experimentales con las relaciones físicas entre las variables¹.

El estudio detallado de estos sistemas se puede realizar a través de la mecánica de fluidos, donde se obtiene información térmica en detalle del mismo, pero requiere mayor exactitud respecto a las condiciones de contorno y en la definición del sistema. La evaluación de las fachadas ventiladas a través de la mecánica de fluido computacional (CFD) se realiza en los casos singulares y una vez ya evaluada la idoneidad de dichos sistemas para el proyecto en cuestión, a través de modelos más sencillos.

Por todo ello es necesario disponer de modelos sencillos, que no requieran mucho tiempo de cálculo, que permitan obtener un resultado indicativo introduciendo unos pocos parámetros que definan el diseño de la fachada ventilada (dimensiones y características térmicas de los materiales) y que sean flexibles a diferentes configuraciones.

5.2. Métodos numéricos en fachadas.

El estudio del flujo en el interior de cualquier canal se encuentra entre las aplicaciones complejas de la mecánica de fluidos. El movimiento relativo en las distintas juntas de dilatación de las placas (responsable del intercambio energético con el fluido) hace que el flujo resulte intrínsecamente no estacionario.

¹ Swainson, 1997; Alfonso et al., 2000

Aparte de la no estacionariedad, la complejidad de la geometría hace que el flujo sea siempre tridimensional y dominado por efectos vorticales (separación de capas límite, flujo secundario).

Todos estos aspectos condicionan los distintos términos de las ecuaciones a considerar y el enfoque numérico para resolverlas, así como las correspondientes condiciones de contorno. La disciplina conocida como Dinámica de Fluidos Computacional (técnicas CFD) ha dado lugar a una posibilidad única en cuanto al análisis del flujo en fachadas, que finalmente se orienta a los distintos procesos de diseño de este tipo de fachadas. Las técnicas numéricas engloban varios aspectos: selección de las ecuaciones del flujo, generación del mallado, establecimiento de las condiciones de contorno apropiadas, elección del modelo de turbulencia, resolución de las ecuaciones en el mallado elegido y post-procesado de resultados.

A pesar de la amplia variedad geométrica y funcional de las fachadas ventiladas, las ecuaciones del flujo son siempre las mismas y sólo en algunos casos se requiere de ecuaciones adicionales como, por ejemplo, en los flujos bifásicos. La primera posibilidad de elección consiste en decidir entre las ecuaciones de Euler o de Navier-Stokes, según la caracterización que se desee hacer de los efectos viscosos del fluido.

Los programas de CFD comerciales son lo suficientemente abiertos (posibilidades para el usuario) y potentes como para que resulte rentable su utilización a escala industrial. Sus beneficios vienen principalmente por el ahorro en el tiempo de desarrollo propio de los programas numéricos así como la facilidad de adaptación a casos diferentes. Típicamente, para calcular un flujo particular, el usuario debe especificar la geometría y las

condiciones particulares del problema, así como proveer al ordenador de ciertos parámetros de resolución para que el programa consiga encontrar una correcta solución del problema. Uno de los mayores inconvenientes de los programas comerciales es que el resultado obtenido depende sustancialmente del mallado generado y de los parámetros elegidos. Hace falta tener un conocimiento profundo tanto de los métodos numéricos como de mecánica de fluidos para que la solución se ajuste a la realidad. Los pasos en los que la información es introducida en el ordenador son los siguientes:

La especificación de la **geometría del problema**. Es preciso introducir al programa los contornos del dominio. Este proceso es relativamente sencillo cuando el modelo es bidimensional, porque se trata de definir unas líneas, que limitan la zona de cálculo. Cuando el modelo es tridimensional, la especificación de la geometría requiere introducir las superficies de contorno del dominio, lo que es sustancialmente más complicado. En concreto, para una fachada ventilada de juntas abiertas el dominio está constituido por el aire exterior o zona de entrada y salida, la pared exterior o revestimiento, el canal de aire y la pared interior o muro convencional.

La **generación del mallado** es una parte fundamental en el contexto de las técnicas numéricas. Se trata de discretizar el dominio de cálculo de una forma ordenada, que permita la resolución optimizada de las ecuaciones, es decir, con un coste de cálculo lo menor posible y una definición de las variables lo más precisa posible en dicho dominio. El problema normalmente es que la validez de un determinado mallado no se puede establecer a priori, sino que hay que esperar a obtener los resultados finales, lo cual exige un proceso iterativo muy laborioso, que se optimiza únicamente con las sucesivas experiencias.

Las técnicas de solución de las ecuaciones diferenciales no lineales pasan por definir el algoritmo de cálculo o procedimiento de obtención de un sistema equivalente de ecuaciones algebraicas y el consiguiente método de resolución de dicho sistema. El paso de las ecuaciones diferenciales a las algebraicas constituye lo que se denomina discretización numérica de las ecuaciones de gobierno. En los programas de CFD estas discretizaciones pueden ser de primer o segundo orden de aproximación a las ecuaciones reales. Con el avance de las técnicas numéricas las discretizaciones de segundo orden son cada día más frecuentes.

En este punto resulta fundamental que la generación del mallado se haya optimizado, en el sentido de obtener un sistema de ecuaciones lineales de dimensiones lo más reducidas posibles y con una estructura tal que la solución matemática de dicho sistema sea lo más estable posible, sin perder definición geométrica.

Las **condiciones de contorno** fijan los valores de la solución en las zonas límite del dominio y resultan parte primordial en cualquier modelo numérico, hasta el punto de que un algoritmo bien planteado puede dar lugar a resultados físicamente imposibles si las condiciones de contorno no son las adecuadas. En la simulación completa de una fachada ventilada, las condiciones que normalmente se ajustan mejor a la realidad son las de presión total en la entrada y presión estática en la salida. Es frecuente también utilizar como condición de entrada una velocidad o caudal fijos. Estas condiciones no son igual de realistas que la anterior, pero facilitan la convergencia numérica y disminuyen el tiempo de cálculo.

Introducción de las **condiciones iniciales**. En el caso de un problema estacionario, la solución final es independiente de los valores iniciales. A pesar de eso, una mala elección puede retrasar el cálculo e incluso evitar que converja. En el caso de un problema no estacionario, las condiciones iniciales representan la solución del flujo en el instante considerado como origen del tiempo, por lo que condicionan sustancialmente los resultados de los sucesivos pasos temporales.

Especificación de **las propiedades del fluido**, tales como la viscosidad y la densidad. Estas magnitudes pueden variar con la temperatura, la presión, etc. En ese caso se debe introducir el modelo matemático de variación, con los parámetros correspondientes. También se pueden considerar varios tipos de problema, según se tenga en cuenta o no la transferencia de calor, en cuyo caso hay que introducir en el programa las propiedades térmicas del fluido de que se trate.

Los **modelos de turbulencia** establecen el nivel de aproximación de la solución adoptada en cuanto a la definición de los términos de fluctuación de las variables, que aparecen en las distintas ecuaciones del flujo. Una breve descripción de los distintos modelos desarrollados en la práctica se incluye en el Anexo I, mientras que la particularización para el estudio de flujos en fachada ventilada de juntas abiertas se incluye en el apartado 5.3 de este mismo capítulo.

Establecimiento de los parámetros que afectan a la resolución numérica del problema. Se puede actuar sobre el proceso iterativo variando los factores de relajación, y fijando los criterios de finalización de las iteraciones.

Finalmente, el post-procesado de los resultados numéricos obtenidos mediante la resolución de las ecuaciones es también un paso importante y laborioso. Se trata de expresar los resultados de forma representativa y de manera que la solución obtenida sea fácilmente interpretable, en lo que se refiere a la evolución de las distintas variables fluidodinámicas que intervienen. Se recurre a la exposición de resultados usando gráficas en color e, incluso, a la animación de imágenes, que explican de una forma muy visual y amena los distintos fenómenos.

Modelos de turbulencia.

El problema práctico de la turbulencia radica en el rango de escalas temporales y espaciales que aparece en flujos con números de Reynolds altos. Estas escalas obligan a definir el dominio de cálculo usando mallados muy finos y con bajos saltos temporales, lo cual tiene implicaciones difíciles de resolver desde el punto de vista de los recursos de cálculo. Las estimaciones de tiempo de resolución de casos prácticos usando la simulación directa de las ecuaciones de Navier-Stokes (DNS) están varios órdenes de magnitud por encima de las posibilidades reales de los ordenadores disponibles en los centros de cálculo (Lakshminarayana, 1991). Esta limitación práctica motiva la utilización de los modelos de turbulencia.

Dentro de los modelos de turbulencia disponibles en la práctica, se rechazaron los modelos algebraicos y los de una ecuación por no ser adecuados a los fenómenos que aparecen en fachadas ventiladas.

En la práctica, los métodos más utilizados son los de dos ecuaciones y, en particular, el modelo k-ε estándar. Se trata de un método que ha sido

desarrollado para otras aplicaciones (Launder et al., 1972) pero que cuenta con algunas aplicaciones prácticas en el campo de las fachadas ventiladas (González et al.2008). Según se indica en esta última de las referencias, el modelo k-e estándar resulta idóneo para estudiar el flujo en fachadas ventiladas, y, más en concreto, para estudiar las características dinámicas de las interacciones fluidodinámicas presentes.

En el anexo I se incluye un resumen de otras posibilidades referidas a la modelización de la turbulencia así como de las ecuaciones que utiliza el modelo k-e, por ser el finalmente seleccionado en el estudio numérico.

Modelo físico de una fachada ventilada de juntas abiertas

El objetivo es presentar un modelo de simulación que describe el comportamiento térmico y dinámico de una fachada ventilada de juntas abiertas. El concepto físico de intercambio de calor que se verifican en la fachada propuesta se presenta en Figura 5.1., donde se muestra una fachada de aplacado cerámico orientada a sur con cámara de aire, aislante y pared interior de ladrillo; construcción arquitectónica que refleja la construcción real de la fachada del edificio CIESOL de la Universidad de Almería.

Los procesos de intercambio de calor han sido descritos en el Capítulo 3 de esta memoria.

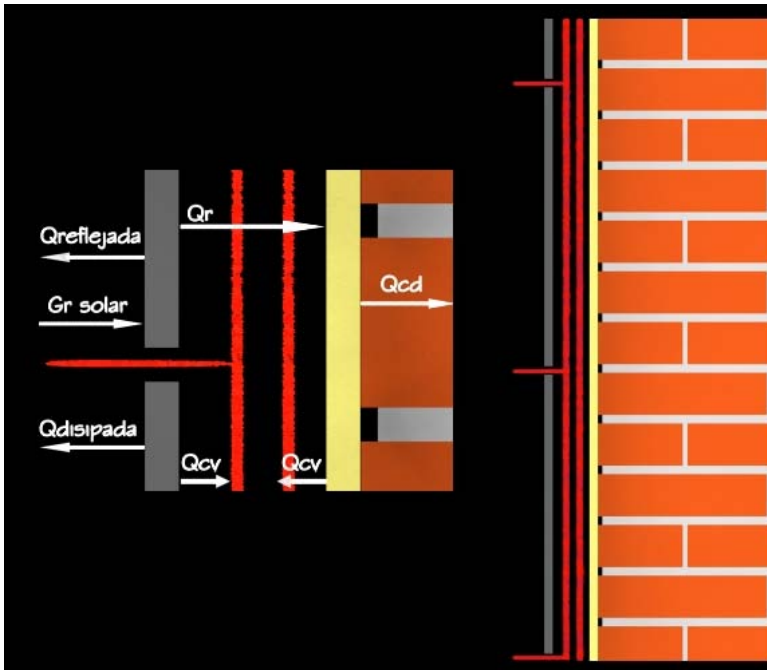


Fig. 5.1. Flujos de calor en la fachada ventilada de juntas abiertas. (Imagen del autor)

5.3. Desarrollo de la modelización numérica.

En este apartado se detallan las condiciones numéricas de la aproximación adoptada para el cálculo del flujo en una fachada ventilada de juntas abiertas. Se describe primero la metodología general utilizada, particularizándose después para los modelos desarrollados.

5.3.1 Fundamentos de Computational Fluid Dynamics. Ecuaciones de Navier-Stokes

El comportamiento físico de cualquier tipo de flujo se encuentra gobernado por funciones continuas del espacio y del tiempo, realizándose la descripción matemática de sus leyes mediante ecuaciones matemáticas en

derivadas parciales, estas leyes forman un sistema no lineal de ecuaciones, llamadas de *Navier-Stokes*.

Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen de un fluido. A través de este proceso se obtiene la llamada *formulación integral* de las ecuaciones. Manipulando las ecuaciones mediante diferentes teoremas matemáticos, se llega a la llamada *formulación diferencial* que resulta más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos.

- Ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mathbf{r} \cdot u_i) = 0$$

- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento: describe la dinámica del medio fluido:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r} \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mathbf{r} \cdot u_i \cdot u_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i} p + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[\mathbf{m} \left(\frac{\partial m_i}{\partial x_j} + \frac{\partial m_j}{\partial x_i} \right) \right] + \mathbf{r} \cdot g_i$$

- Ecuación de la energía: que escrita en termino de entalpía sensible H :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r} \cdot H) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mathbf{r} \cdot u_i \cdot H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left[\frac{K}{c_p} \cdot \frac{\partial H}{\partial x_i} \right] + S_H$$

donde:

u_i = componente de la velocidad (u, v, w)

H = *Entalpía* y S_H incluye el calor por reacción química y por otras fuentes de calor volumétricas.

5.3.2 Software y hardware.

Se definen los medios disponibles y los programas utilizados durante el estudio numérico desarrollado.

Software.

Se ha optado por realizar los cálculos para una fachada ventilada de juntas abiertas utilizando un programa comercial. En concreto se ha elegido el programa FLUENT 6.3 (10 Cavendish Court, Centerra Resource Park, Lebanon NH 03766, USA).

Los cálculos numéricos se han realizado con geometrías bidimensional y tridimensional, usando el código numérico comercial FLUENT. Dicho programa requiere una definición previa de las geometrías a utilizar en otro programa de pre-procesado denominado GAMBIT. El post-procesado de los resultados va incluido en el propio programa y además permite la salida de ficheros de datos con las evoluciones de las distintas variables u otros parámetros que se deseen recoger a partir de los cálculos realizados.

El programa FLUENT resuelve las variables del flujo para una gran variedad de problemas imponiendo las correspondientes condiciones de contorno y parámetros de resolución apropiados (tipo de algoritmo de resolución, modelos de turbulencia, tipo de fluido, etc.). Dicho programa resuelve las ecuaciones de gobierno utilizando un método de volúmenes finitos (Patankar, 1980), pudiéndose elegir entre resolución acoplada (todas las ecuaciones a la vez) o segregada (resolución por separado de las ecuaciones, más apropiadas). Dispone también de la posibilidad de elegir el tipo de discretización a utilizar, de primer o segundo orden de precisión

espacial. El tratamiento de la turbulencia se puede hacer según distintos modelos que van desde los de una ecuación hasta los más avanzados, basados en técnicas de simulación de grandes vórtices (técnicas LES, véase Hirsch, 1988). Además, el programa permite el post-procesado de los resultados, generando gráficas y representaciones de las variables obtenidas.

Se ha llegado a la definición del flujo bidimensional estacionario para una geometría elemental. Los resultados obtenidos a partir de los programas desarrollados se muestran en el Capítulo 6.

Hardware.

El programa FLUENT se encuentra disponible para todo tipo de estaciones de trabajo habituales. La versión utilizada se ejecuta bajo el sistema operativo WINDOWS NT. Los problemas bidimensionales se han resuelto en un ordenador personal, Intel(R), Pentium(R), CPU 2.80GHz, 2.79 GHz. La memoria RAM de estos equipos es de 0.99 GB. Durante la resolución de estos problemas se han utilizado algunos de los medios de cálculo disponibles en el CIEMAT, en concreto, hasta 2 ordenadores se han llegado a utilizar simultáneamente.

Los problemas tridimensionales se han resuelto en el "hardware" de la plataforma propia del CIEMAT: Servidor: Cluster HPC; sistema operativo: Red Hat Enterprise Linux release 4; memoria principal: 2 GB por core; capacidad en disco: 146 GB por nodo. El sistema de supercomputación está formado por un conjunto de nodos de cálculo organizados en forma de cluster de alto rendimiento (HPC) con 144 blades para cálculo, 2 nodos de gestión en cluster de alta disponibilidad y 2 nodos de acceso interactivo en cluster en balanceo de carga. En cuanto al sistema de almacenamiento, está formado por 6

servidores, conectados también a las redes Infiniband y ethernet, y con una capacidad de espacio en disco de 60 TB brutos. El software que gestiona este sistema es Lustre, que está organizado como un sistema de ficheros paralelo, proporcionando un alto ancho de banda en el acceso a los mismos.

A continuación se explica detalladamente el procedimiento y valores de los distintos parámetros empleados, así como la forma en que se ha utilizado el programa en las modelizaciones bi- y tridimensionales, así se muestran algunos resultados típicos obtenidos en la simulación de una fachada ventilada de juntas abiertas.

Discretización

Para la caracterización del campo fluido en un tiempo y espacio continuo se necesita poder considerar un número infinito de variables (presión, velocidad, temperatura, etc..) y cualificar el valor de cada una de ellas en todo punto del espacio y del tiempo. Para poder calcular dichos valores utilizando un método numérico se debe simplificar el espacio y tiempo continuo en un conjunto discreto de instantes y puntos, que es lo que se denomina *discretización*.

Un código CFD trabaja dividiendo la región de interés en un gran número de celdas o volúmenes de control (cuyo conjunto crea el *mallado*) delimitados en sus aristas por puntos o nodos. En cada uno de estos nodos, las ecuaciones matemáticas en derivadas parciales que describen el flujo del fluido se reemplazan por aproximaciones algebraicas que vinculan las varias variables. Cuanto mayor es el número de celdas, más exacto y próximo a la

realidad será la solución. El método de discretización utilizado para CFD se denomina *Método de los volúmenes finitos*.

Las formas básicas por un mallado son el hexaedro, el prisma y la pirámide, con combinaciones entre ellos. El mallado hexaedro (*Hex*) dispone de múltiples variantes y es la opción más apropiada para el modelado de recintos con geometría simple, que es lo que tenemos en estudio. Para geometría complejas, con objetos esféricos y elipsoides, las otras son más apropiadas (*Tet, Wedge, Pyramid*).

Entre las opciones de dibujo se escoge las generaciones de superficies y volúmenes por barrido a partir de ejes (*sweep edge* y *sweep faces*). Para modelar los contornos que delimitan los volúmenes, el mallado permite aumentar la densidad de manera gradual mediante valores de crecimiento.

Para los dos modelos 2D y 3D se ha creado un dominio representativo del problema, en este caso las diferentes partes que componen la pared: plaquetas cerámicas, cámara de aire y pared trasera, así como un parte del ambiente exterior a la pared, lo que evita suponer un coeficiente de transmisión de calor entre las plaquetas y el propio aire. Estas partes se pueden ver en las Figuras 5.2., 5.3., 5.4., 5.5., 5.6.. Las dimensiones de los dos modelos como las propiedades de los materiales se muestran en las Tablas 5.1., 5.2., 5.3..

Por el modelo 2D se consideró como altura del dominio la altura de la zona de monitorización (Figura 4.7b. del capítulo 4).

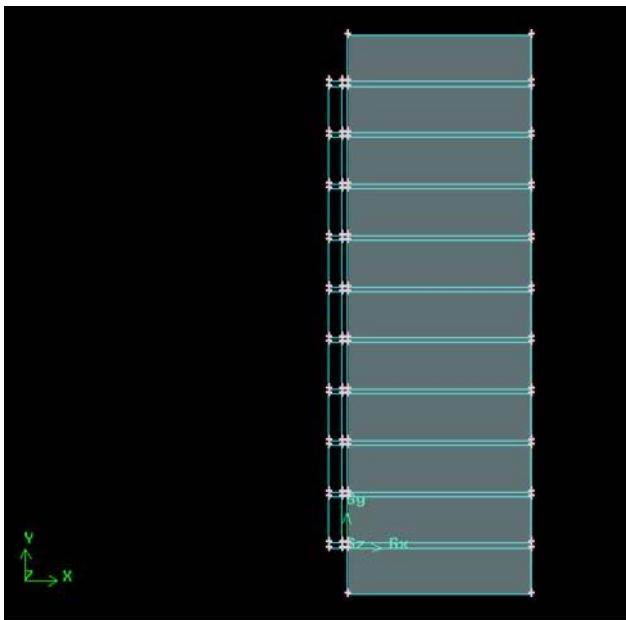


Fig. 5.2. Parte del dominio representativo del ambiente exterior del modelo 2D utilizado en la simulación

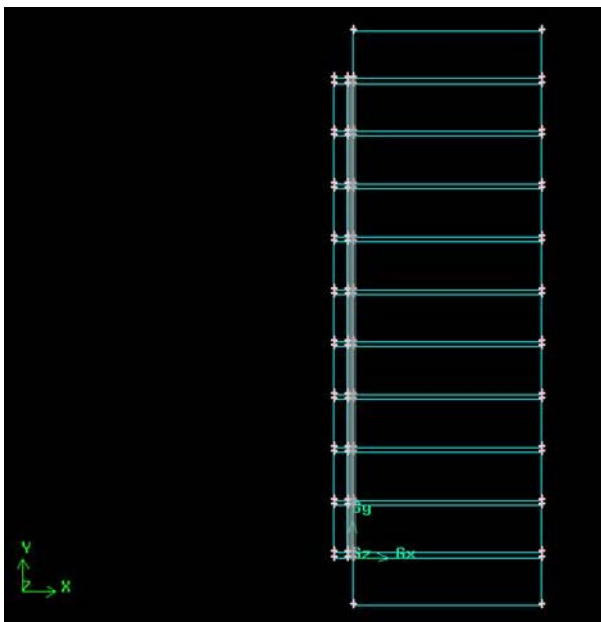


Fig. 5.3. Parte del dominio representativo de las placas cerámicas del modelo 2D utilizado en la simulación

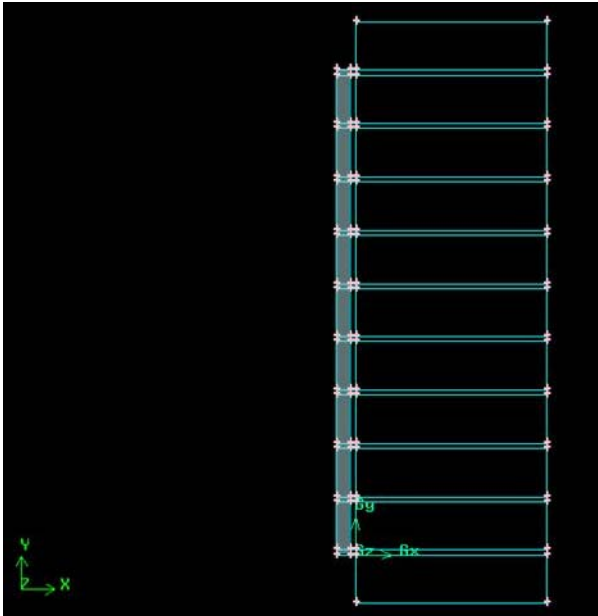


Fig. 5.4. Parte del dominio representativo de la cámara de aire del modelo 2D utilizado en la simulación

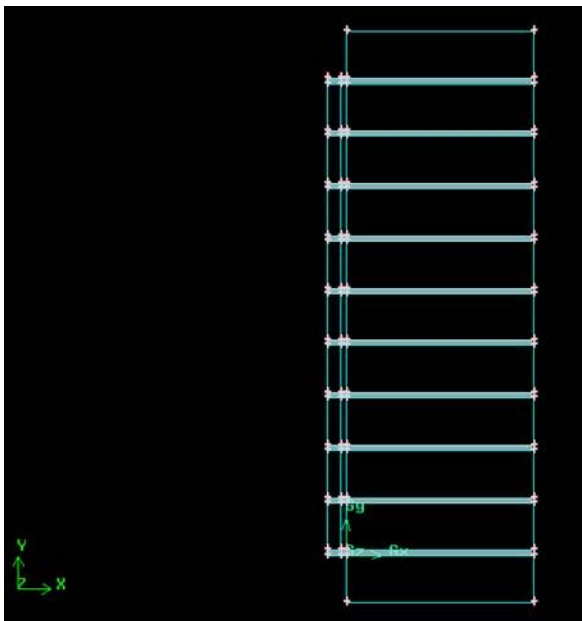


Fig. 5.5. Parte del dominio representativo de las juntas de dilatación entre placas del modelo 2D utilizado en la simulación

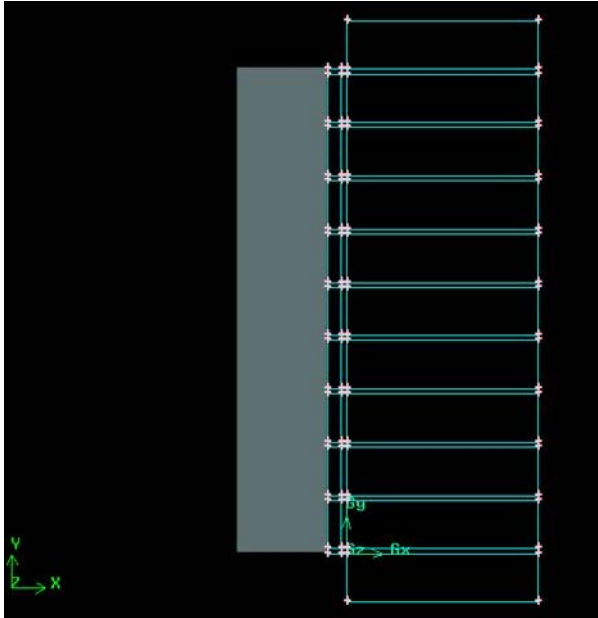


Fig. 5.6. Parte del dominio representativo de la pared trasera del modelo 2D utilizado en la simulación

Tabla 5.1: Dimensiones del Modelo 2D la fachada ventilada de juntas abiertas del edificio CIESOL

Dimensiones	Valor	Unidad
Altura tot. dominio	5.35	m
Hancho tot. dominio	1	m
Juntas verticales	5	mm
Juntas horizontales	5	mm
Camara de aire	4	cm
Espesor plaquetas	1	cm
Pared interior	12	cm

Tabla 5.2.: Dimensiones del Modelo 3D la fachada ventilada de juntas abiertas del edificio CIESOL

Dimensiones	Valor	Unidad
Altura tot. dominio	6.80	m
Hancho tot. dominio	0.335	m
Profundidad tot. dominio	2	m
Juntas verticales	5	mm
Juntas horizontales	5	mm
Camara de aire	4	cm
Espesor plaquetas	1	cm
Pared interior	12	cm

Tabla 5.3.: Condición atmosféricas utilizadas en las simulaciones.

Variable	Unidad	Verano	Invierno
$T_{Ext.}$	°C	35	10
$T_{Int.}$	°C	30	22
Radiación solar	W/m ²	0 a 800	0 a 600

El proceso general de dibujo consiste en trazar las dimensiones sobre las tres direcciones y mallar las líneas resultantes considerando aquellas zonas que requieren una mayor densidad de celdas.

El paso siguiente es la generación de una cara del recinto a partir de una arista y un eje directriz, para posteriormente proceder a la creación del volumen de manera similar, con una cara y una directriz.

Para esto se utiliza *Gambit*, que es específicamente un pre-procesador cuya misión es la creación de la geometría, la generación del mallado y la asignación de las propiedades de contorno y de características. El dibujo resultante es un fichero exportable a *Fluent*.

En las Figuras 5.7., 5.8., 5.9., 5.10. se presentan la discretizaciones del modelo 2D y 3D construido por la fachada ventilada de juntas abiertas del edificio CIESOL de Almería.

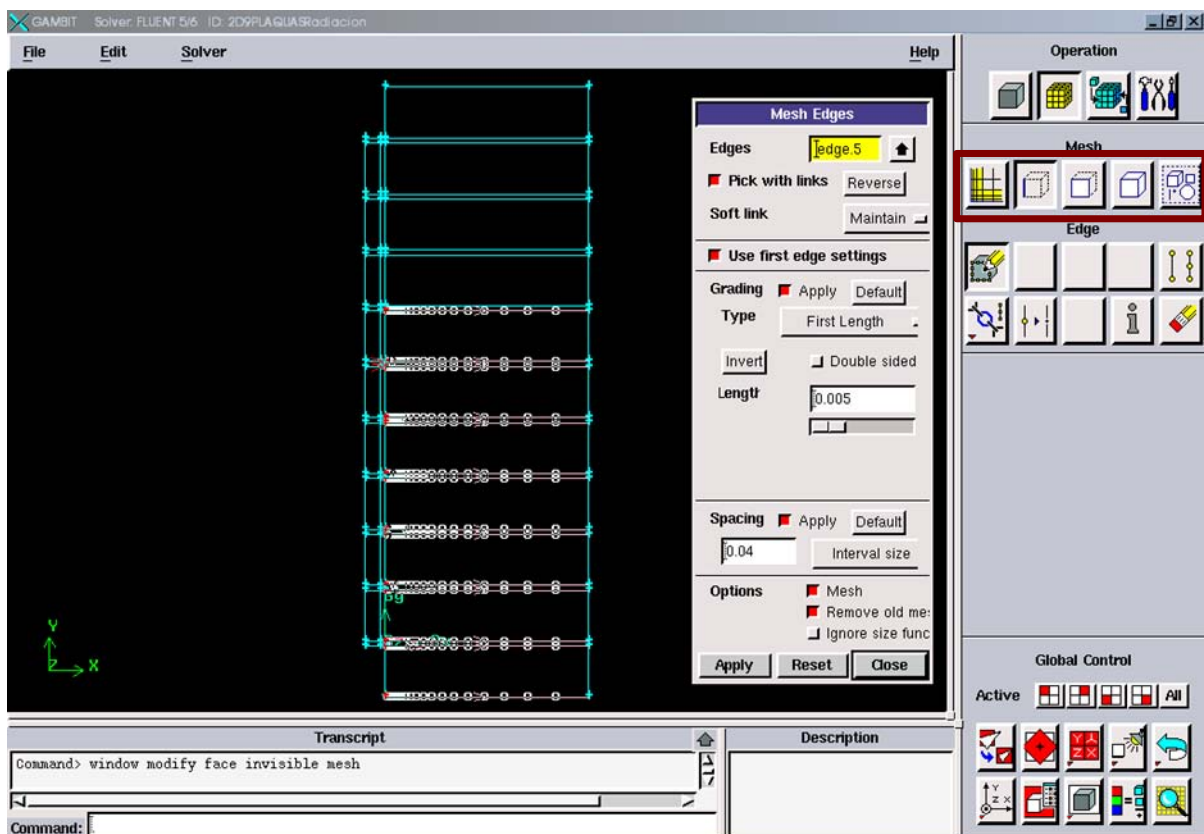


Fig. 5.7. Creación del mallado del modelo 2D utilizado en la simulación

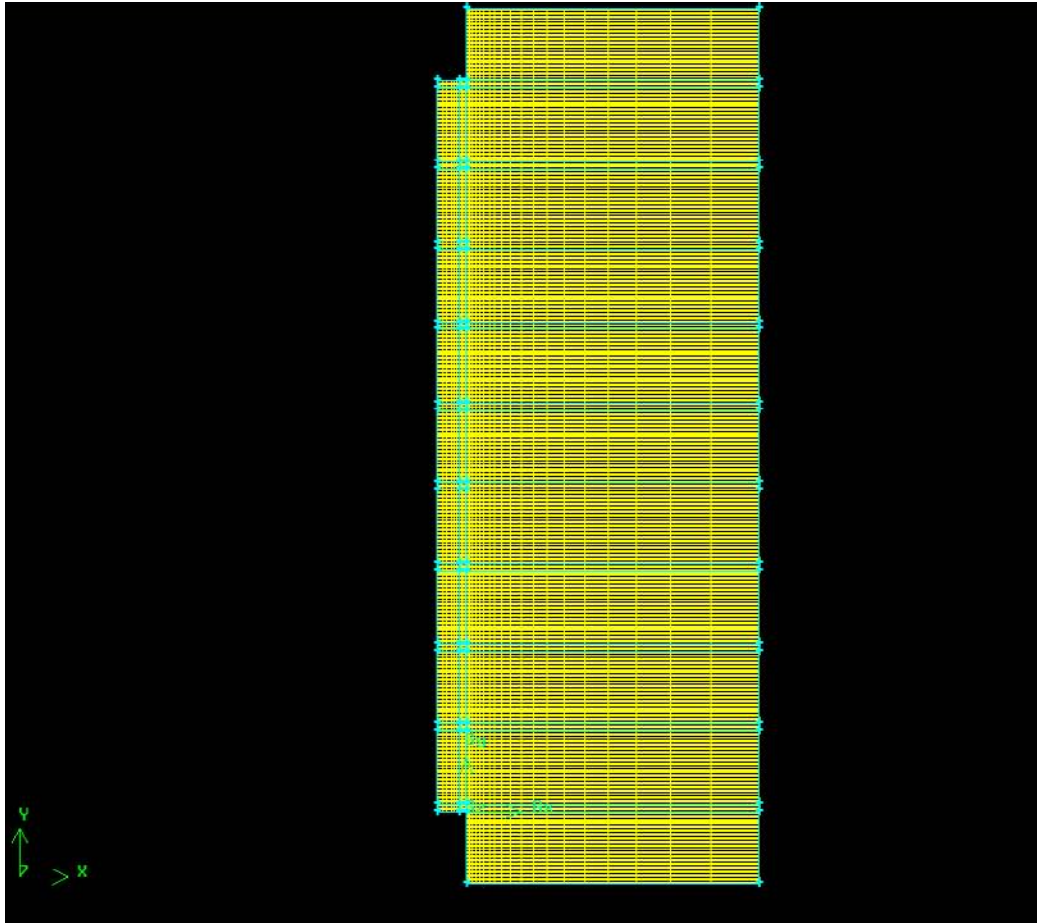


Fig. 5.8. Mallado del modelo 2D utilizado en la simulación

El mallado que se ha utilizado en la mayor parte de los cálculos bidimensionales es cuadrilátero y constituido por 13600 celdas, como se muestra en la Figura 5.8..

Los resultados evaluados de las simulaciones de este primer modelo 2D, capítulo 6, sirvieron para captar de forma aproximada la mayoría de los fenómenos que se presentan en la realidad del comportamiento de la

fachada. Entonces partiendo de este se han creado discretizaciones de modelos en 3 dimensiones (Anexo II.2), hasta llegar al óptimo, en los cuales se ha decidido tener en cuenta la altura total de la fachada y no solo la altura de la parte monitorizada.

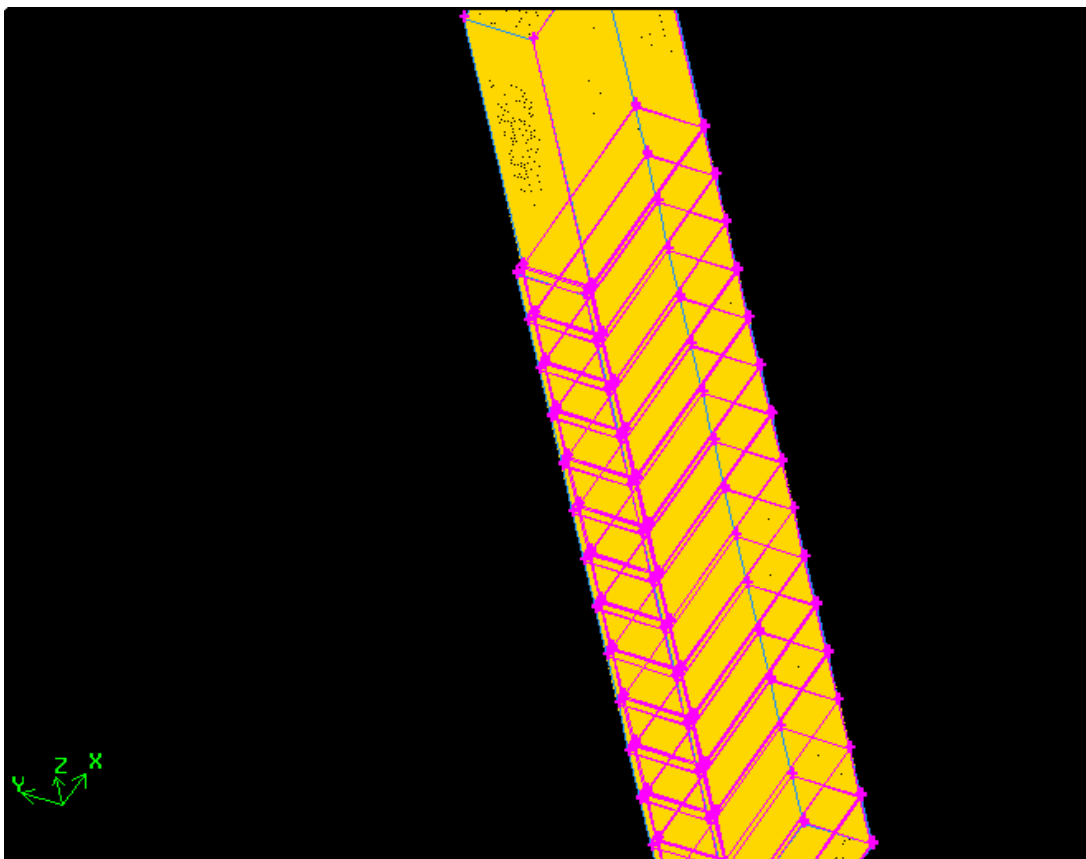


Fig. 5.9. Mallado del modelo 3D utilizado en la simulación

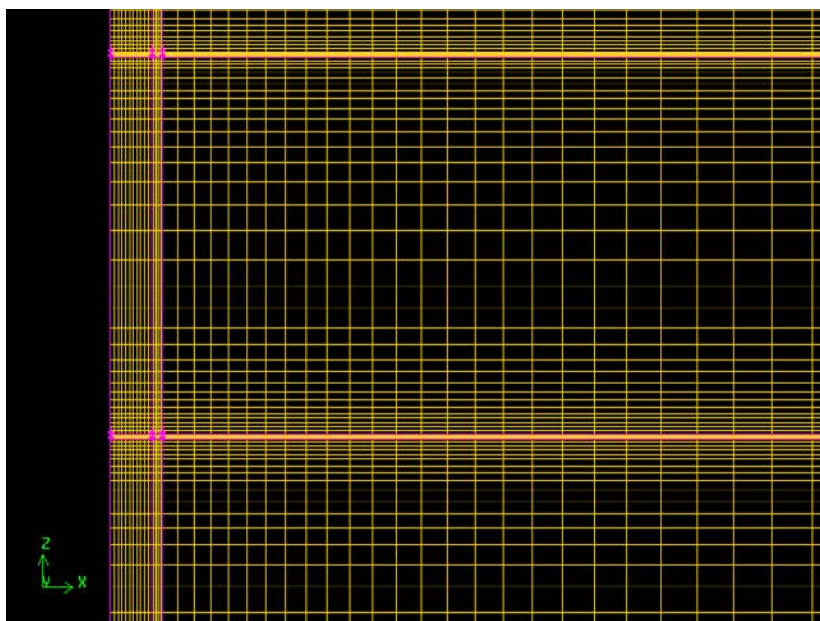


Fig. 5.10. Detalle del mallado en las juntas de dilatación, en las placas cerámicas y en la cámara de aire del modelo 3D utilizado en la simulación

El mallado utilizado para las simulaciones tridimensionales es de tipo hexaedro y constituido por 587100 celdas, y en la Figura 5.10. se puede comprobar la mayor densidad de puntos para la discretización de la zona de las juntas de dilataciones entre las placas cerámica que constituyen el revestimiento exterior de la fachada.

Cuanto más fino sea el mallado de un problema más correcta será, en principio, la solución que se obtenga a partir de él. Por ello, interesa refinar el mallado todo lo posible, dentro de la capacidad de cálculo del ordenador utilizado. Sin embargo, al estar utilizando métodos numéricos para la resolución del problema siempre existe un cierto error, independientemente de la finura del mallado.

Con el fin de saber cuál es la finura del mallado adecuado se procede por tanteo, probando a resolver el problema del flujo con distintas densidades

del mallado, refinando progresivamente. Cuando, al utilizar un mallado más pequeño, la solución del problema apenas varíe, se habrá llegado al nivel de refinamiento óptimo.

Configuración de las condiciones de contorno

Una vez definido y discretizado el modelo se debe especificar una serie de condiciones de contorno conocidas de antemano. Así en las paredes solidas la velocidad del fluido es nula, en las caras superior e inferior se establece presión atmosférica. También son datos la temperatura ambiente en el exterior y la de confort interior, en la Tabla 5.3. se especifican los valores de verano e invierno. En esta pared se supone un intercambio radiante-convectivo con resistencia superficial $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$, recomendada por el CTE.

Para simular el efecto de la radiación solar incidente se emplea una radiación solar modelizada como una carga térmica incidente en fachada y una carga incidente sobre el terreno con rayo de incidencia de 60° . Se ha utilizado radiación solar variante en los dos periodos invierno y verano como se especifica en la Tabla 5.3..

La simulaciones se llevaron acabo suponiendo que la velocidad del aire exterior era nula (viento en calma).

La correcta definición de las condiciones de contorno resulta imprescindible para obtener resultados que estén de acuerdo con los ensayos experimentales que pretenden simular, las condiciones de contorno especifican las características del flujo interviniente, las condiciones

ambientales, las incógnitas, el régimen de flujo, su variación en el tiempo, etc...(Tablas 5.4. y 5.5.)

Tabla. 5.4.: Condiciones de contorno modelo 2D

Superficie	Tipo de condición	Variable	Valor
Domain Top	Pressure Outlet	Pressure (Pa)	0
Domain Bottom	Wall	Temperature	T_{bottom}
w-Room	Wall	Temperature	$T_{exterior}$
w-ExteriorWall	Wall	Heat flux	0
w-ExteriorInfWall	Wall	Temperature	$T_{exterior}$

Tabla. 5.5.: Condiciones de contorno modelo 3D

Superficie	Tipo de condición	Variable	Valor
Domain Top	Pressure Outlet	Pressure (Pa)	0
Domain Bottom	Pressure Inlet	Pressure (Pa)	0
Domain AL	Wall	Temperature	$T_{exterior}$
Domanin AT	Wall	Heat Transfer	$T_{exterior}$
Canal Top	Wall	Heat Flux	0
Canal Bottom	Wall	Heat Flux	0
Lateral Isq.	Symmetry	-	-
Lateral Dcha.	Symmetry	-	-

Tras la importación del fichero *.mesh* con la geometría y el mallado del modelo, se imponen las condiciones de contorno específicas del problema.

En primer lugar se define una función *UDF* (User Define Funtion) que permite configurar los materiales intervinientes, en nuestro caso, Tabla 5.6..

Tabla 5.6.: Propiedades de los Materiales de la fachada ventilada de juntas abiertas del CIESOL

Elemento	ρ	C_p	K	μ
Unidad	kg/m^3	$J/kg/K$	$W/m K$	$10^5 kg/m \cdot s$
Plaquetas	2800	1000	3.5	-
Pared interior	1000	1000	0.046	-
Aire	1.145	1010.17	0.025	1.841

Modelos de turbulencias

Los flujos estudiados en el campo de la ventilación, por ejemplo el flujo atmosférico del viento, son siempre altamente turbulentos.

Un flujo laminar es suave, regular y constante. El fenómeno de la turbulencia se caracteriza por ser desordenado, tridimensional, transitorio, difusivo, etc., modificando significativamente parámetros tales como la resistencia de fricción, la transmisión de calor o la capacidad de mezcla, por lo que es necesario su estudio y caracterización.

Los flujos turbulentos se caracterizan por varias escalas de remolinos turbulentos, desde los de gran escala portadores de energía hasta los de pequeña escala disipativa. De ahí que la más importante decisión en la simulación numérica es como pormenorizar el estudio para resolver estos remolinos en el análisis numérico. Dicho análisis numérico de flujo turbulento tiene un serio obstáculo en la *microescala Kolmogorov* ?, cuyo concepto

surgió a partir del estudio de la teoría de la estadística de turbulencias, este remolino es el mas pequeño registrado, medido en ventilaciones de recintos o en la acción natural del viento, de un tamaño que va de 0,1 a 1 mm. Para superar este obstáculo, se han inventado varios tipos de modelos de turbulencia. El modelado de turbulencia se ha diseñado, en realidad, para simular los valores medios del campo de flujo existente y las propiedades estadísticas de sus fluctuaciones, más que para representar el campo del flujo original.

Para flujo laminar, se calculan las ecuaciones clásicas de Navier-Stokes. En el caso de flujo turbulento, se hace según el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (*Reynolds Average Navier-Stokes RANS*).

El concepto principal del promediado de Reynolds es expresar cada una de las magnitudes fluidas (velocidad, presión, etc..) como un valor promedio de las distintas magnitudes actuantes, además de un valor fluctuante a partir de ese valor medio. A continuación dichos valores se introducen en las ecuaciones de Navier-Stokes, considerando un flujo incomprensible, y se realiza el promedio de las mismas.

En los flujos laminares, la mezcla del fluido y la transferencia de calor tienen lugar a nivel molecular. La conductividad térmica es la cantidad que determina la transferencia de calor. En los flujos turbulentos, el grado de la transferencia de calor es muy superior que en fluido laminares, y tiene lugar a nivel global. Para flujos turbulentos la cantidad de transferencia de calor se calcula mediante la conductividad térmica efectiva, que es la suma de la conductividad térmica del fluido y la conductividad turbulenta.

No existe acuerdo entre los investigadores acerca de cual es el modelo de turbulencia que expresa mejor el comportamiento del aire en un canal.

Existen numerosos estudios sobre el tema de la turbulencia. Entre ellos los realizados por Chen Q., que recomienda los modelos de dos ecuaciones *k-e*. Mediante la comparación de los diferentes términos del modelo *RNG k-e* con resultados experimentales, Gan G. encontró que este modelo predecía la flotabilidad inducida por la diferencia de temperaturas mejor que otros. El desarrollo del nuevo modelo *Realizable k-e* está desarrollado para facilitar el calculo de las ecuaciones que dificultan su analisis y así minimizar los esfuerzos, siendo más adecuados para utilizar por defecto en modelos con numero de Reynolds bajo.

En este caso se ha utilizado el modelo Standard *K-e*.

Tiempo de CPU

El tiempo típico de cálculo para la obtención de una solución estacionaria (sin considerar el tiempo requerido para construir la discretización y establecimiento de las distintas condiciones de contorno) ha resultado ser de unas 24 horas de CPU del “cluster”.

Beneficio del uso de CFD en fachada ventilada

En la introducción se ha mencionado algunas de las ventajas de las técnicas CFD en general, pero hay que hacer hincapié de los beneficios que

aportan cuando se utilizan en el campo específico del estudio de sistemas de fachadas ventiladas.

En fase de diseño CFD permite disponer de una gran flexibilidad para poder simular diferentes geometrías de fachadas: el hecho de reproducir experimentalmente estas distintas situaciones representaría un alto costo de tiempo y dinero. Por otro lado está la posibilidad de modificar fácilmente algunos parámetros del propio sistema, como la velocidad del aire o las temperaturas, que permiten el estudio de situaciones extremas difíciles de reproducir en laboratorio.

La fase de análisis de resultados hace posible obtener una gran cantidad de parámetros que experimentalmente son una tarea ardua y lenta de calcular. Por ejemplo la velocidad del aire en medio del canal: no siempre es posible posicionar bien los sensores en este sitio.

Sin embargo también las técnicas CFD poseen algunas limitaciones o incertidumbres que deben tenerse en cuenta: por esta razón una parte importante y necesaria de cualquier simulación numérica es la validación experimental de los modelos utilizados, para garantizar la credibilidad de los resultados obtenidos.

En la práctica no existen demasiados casos bien documentados con validaciones a tamaño real y tridimensional del estudio sobre fachadas ventiladas de juntas abiertas.

5.4. Conclusiones

En este capítulo, se han definido los medios de cálculo utilizados durante el desarrollo de los distintos modelos numéricos. Los cálculos con el modelo bidimensional se han realizado individualmente en varios ordenadores personales mientras que los correspondientes al modelo tridimensional se han llevado a cabo en un “cluster”.

Se ha descrito el modelo numérico utilizado, definido en el marco del programa comercial FLUENT. Se han definido dos modelos, bidimensional y tridimensional, ambos para fluido incompresible, con un modelo de turbulencia tipo k-estándar.

Para los modelos se ha utilizado la geometría de la fachada ventilada de juntas abiertas estudiada experimentalmente (Anexo II.1).

Con los modelos definidos, se han llevado a cabo cálculos numéricos estacionarios. Los cálculos estacionarios permiten comparar las prestaciones globales del modelo numérico con los experimentos. Se ha realizado un análisis exhaustivo de las distintas posibilidades disponibles en el programa utilizado respecto a modelos de turbulencia, discretización de las ecuaciones, etc. También se ha descrito la limitación de los resultados respecto su dependencia del mallado utilizado.

Los resultados obtenidos numéricamente se comparan con los experimentales en el próximo capítulo.

6. Validación del modelo fluido-dinámico con datos experimentales y termografías

6.1. Introducción.

Los modelos propuestos han sido desarrollados de forma teórica, considerando la teoría de transferencia de calor.

Ambos modelos, en dos y tres dimensiones, han sido diseñados para poder describir el comportamiento de la fachada ventilada de juntas abiertas del edificio CIESOL, ubicado en la Universidad de Almería. Este edificio es uno de los cinco contenedores-demostradores de investigación dentro del Proyecto Singular Estratégico de Arquitectura Bioclimática y Frió Solar (PSE-ARFRISOL) que se está desarrollando por la UiE3 del CIEMAT y otros participantes.

La fachada objeto de esta memoria, consiste en una fachada ventilada con orientación sur, con revestimiento exterior cerámico (modelo Ston-Ker di Porcelanosa), cámara de aire, aislamiento de poliuretano y un muro interior de alta inercia térmica, en el Anexoll.1 se muestra el sistema constructivo con las dimensiones de las distintas capas.

Para la evaluación de los modelos se han introducidos las series de datos correspondiente a la temperatura ambiente, temperatura de las plaquetas y de la pared interior, radiación global sobre superficie vertical (orientada al sur) que ya han sido presentado en el Capítulo 4.

Hasta el momento en la bibliografía todavía no se han contrastado los datos teóricos de los modelos de fachadas ventiladas de juntas abiertas con los datos experimentales. En la presente investigación se ha realizado una validación de los

modelos propuestos tanto de forma cualitativa como cuantitativa, a través de datos experimentales y termografías.

En el caso del modelo en dos dimensiones se ha creado un modelo totalmente nuevo empezando de un modelo vasto hasta llegar a uno con detalle muchos mas finos y correspondientes a la realidad de la fachada monitorizada, a este modelo se le ha añadido un efecto de la radiación en el suelo y la parte del dominio que representa el espacio exterior ha sido tratada como si fuera un vidrio para poder así manejar varias radiaciones considerando varios ángulos de incidencias sobre la fachada. Estos modelos sirvieron para captar de forma aproximada la mayoría de los fenómenos que se presentan en la realidad del comportamiento de la fachada.

El modelo desarrollado en tres dimensiones sigue el esquema del modelo propuesto en bibliografía (González, et al., 2008), a este se le ha añadido radiación en el suelo, como en el modelo 2D para poderlo comparar con las termografías, además se ha variado la geometría, aumentando la altura total del dominio; es decir que se ha tenido en consideración la altura total real de la fachada y no solo la de la parte monitorizada. El dominio se ha tratado con las mismas condiciones impuestas en el modelo 2D.

6.2. Variables de validación y resultados.

Para contrastar los resultados teóricos con los datos experimentales es necesario elegir las variables a considerar.

Las variables más interesantes, en principio, de la fachada ventilada de juntas abiertas y que son determinantes para la descripción energética del sistema

de ventilación son: las temperaturas de las plaquetas cerámicas, las temperaturas del aire interior del fluido, las temperaturas de la pared interior.

Estudio Termográfico

En la actualidad la termografía está siendo ampliamente utilizada para la inspección de edificios urbanos, viviendas y oficinas. Se encuentran trabajos centrados en la inspección de instalaciones¹, de acabados² y del aislamiento térmico³; la mayoría de las aplicaciones se emplea para análisis cualitativos pero también aparecen algunos estudios cuantitativos⁴.

Todos los materiales tienen la capacidad de absorber radiación infrarroja aumentando su temperatura; asimismo todos los materiales con una temperatura superior al cero absoluto emiten energía infrarroja. La termografía es una técnica que aprovecha la radiación emitida por la superficie de un cuerpo como variable termométrica. Esta radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura superficial del objeto (Ley de Stefan-Boltzmann):

$$W = e s T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Donde W es la energía radiante de un cuerpo, e es la emisividad (valor entre 0 y 1), s es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) y T es la temperatura absoluta del objeto.

¹ Balaras, C. A; Argiriou, A. A. Infrared thermography for building diagnostics. Energy and Buildings, vol. 34. 2002. pp 171-183.

² Li, Z; Yao, W; Lec, S; Lec, C; Yang, Z. Application of infrared thermography technique in building finish evaluation. Journal of Nondestructive Evaluation. vol. 19. 2000. pp 11-19

³ Haralabopoulos, D. A; Paparsenos, G. F. Assessing the thermal insulation of old buildings. The need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography. Energy Conversion and Management. vol.9. 1998. pp 65-79.

En la práctica se puede considerar la emisividad como una constante propia de cada material, aunque en realidad es función de la longitud de onda, de la temperatura y del ángulo de incidencia. Por tanto, si se conoce la emisividad del objeto que vamos a inspeccionar, la medida de la radiación nos dará un valor de temperatura. Los materiales típicamente empleados en la construcción tienen emisividades superiores a 0,8, estos valores hacen que la temperatura medida mediante termografía proporcione valores fidedignos. Por el contrario los metales o materiales brillantes tienen emisividades entre 0,05 y 0,2, por lo que resulta difícil medir su temperatura si no se emplean sistemas para aumentar su emisividad.

Mediante la captación de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo, la cámara es capaz de medir diferencias de temperaturas por debajo de 0.08 °C. El espectro infrarrojo se extiende desde el límite del rango visible hasta llegar a la región de las microondas. Sin embargo, existen dos regiones donde la transmisión es más elevada, la zona de 3 a 5 1/4 m (sistemas de onda corta) y la zona de 8 a 13 1/4 m (sistemas de onda larga)⁵. El equipo empleado en nuestro trabajo es un sistema de onda larga, puesto que es más recomendado para el uso en exteriores porque captan con más dificultad las reflexiones solares y son más sensibles a las radiaciones de baja temperatura del entorno. Se trata de un sistema de captación de imágenes térmicas que representan la distribución superficial de temperaturas del objeto observado, permitiendo la realización de medidas y análisis térmico sobre la propia imagen.

El uso de la termografía infrarroja para la inspección de edificios requiere un conocimiento previo de los fenómenos físicos que tienen lugar entre el exterior y el interior.

⁴ Grinzalo. E; Vavilov. V; Kauppinen. T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, vol. 29. 199R.pp 1-9.

⁵ I. Cañas Guerrero, S. Martín Ocañal, I. González suitability of infrared thermography for the examination of rural buildings: the particular case of a spanish region. *Informe de la Construcción*. Vol. 55 n. 488, 2003.

Durante el día, la radiación solar que incide sobre la superficie exterior es absorbida haciendo que aumente la temperatura. Por la noche el calor es disipado desde la fachada hacia el ambiente exterior a menor temperatura por radiación. La capacidad de acumulación de calor de un cuerpo es función de su volumen, de su densidad y de su calor específico, cuantos mayores sean éstos, el cuerpo acumulará más calor/frío y mantendrá su temperatura durante más tiempo transcurrido el período de calentamiento/enfriamiento. Las diferencias de temperaturas en los elementos de las fachadas estarán determinadas por las distintas cualidades de los materiales.

Con el fin de evitar el conflicto del aumento de temperatura debido a la radiación solar, las inspecciones se deben realizar por la noche o en días nublados, con poco viento, para reducir las pérdidas por convección.

Las inspecciones termográficas se han realizado desde el exterior del edificio, por tanto se han obtenido mapas de temperaturas de las fachadas de los mismos. Con este sistema se pueden diagnosticar los defectos de los edificios que lleven aparejadas variaciones de las temperaturas superficiales. El objetivo es localizar zonas problemáticas para un posterior análisis. Los resultados obtenidos se basan en comparación de temperaturas de una superficie y no con valores absolutos, es decir, se trata de un análisis cualitativo.

Las inspecciones termográficas se han realizado en dos jornadas, la tarde-noche del 24 de Julio de 2008. La hora del día se ha seleccionado de forma que no incida la radiación solar para evitar que se enmascaren algunos fallos constructivos. Para la realización de las inspecciones se han seguido las

indicaciones propuestas en la norma europea EN 13187: 1998⁶. La cámara empleada es una **Thermocam SC 660** de FLIR SYSTEMS (proporcionada por el CIEMAT) y el software es **ThermaCam Quickreport 1.1** de la misma firma. La cámara tiene la capacidad de procesar tanto imágenes visuales como térmicas.

Especificaciones técnicas:

- Campo de visión/Distancia mínima de enfoque: 24° x 18° /0,3 m
- Sensibilidad térmica: 0,045 °C a 30 °C
- Resolución espacial: 0.65 mrad

Temperaturas de las plaquetas

Se dispone de una serie de datos experimentales de temperaturas para la superficie interior (cara al canal de aire) del revestimiento de la fachada, compuesto da plaquetas cerámicas. Estos datos se contrastan directamente con las temperaturas medias de la cara interior al canal de aire de las plaquetas obtenidas con el modelo de dos y tres dimensiones. Mientras que las temperaturas al exterior de las plaquetas estimadas por los dos modelos se contrastan con las imágenes de las termografías.

Del análisis de los resultados del primer modelo 2D, en lo cual se tenía en cuenta como altura del dominio solo la parte monitorizada se ha dado cuenta que el modelo estaba bruscamente interrumpiendo los fenómenos representativo de la fachada, Figura 6.1.. Por ese motivo, se decidió subir la altura del dominio a la total de la fachada.

⁶ EN 1.1 187: 1998. Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method (ISO 6781 : 1983 modified).

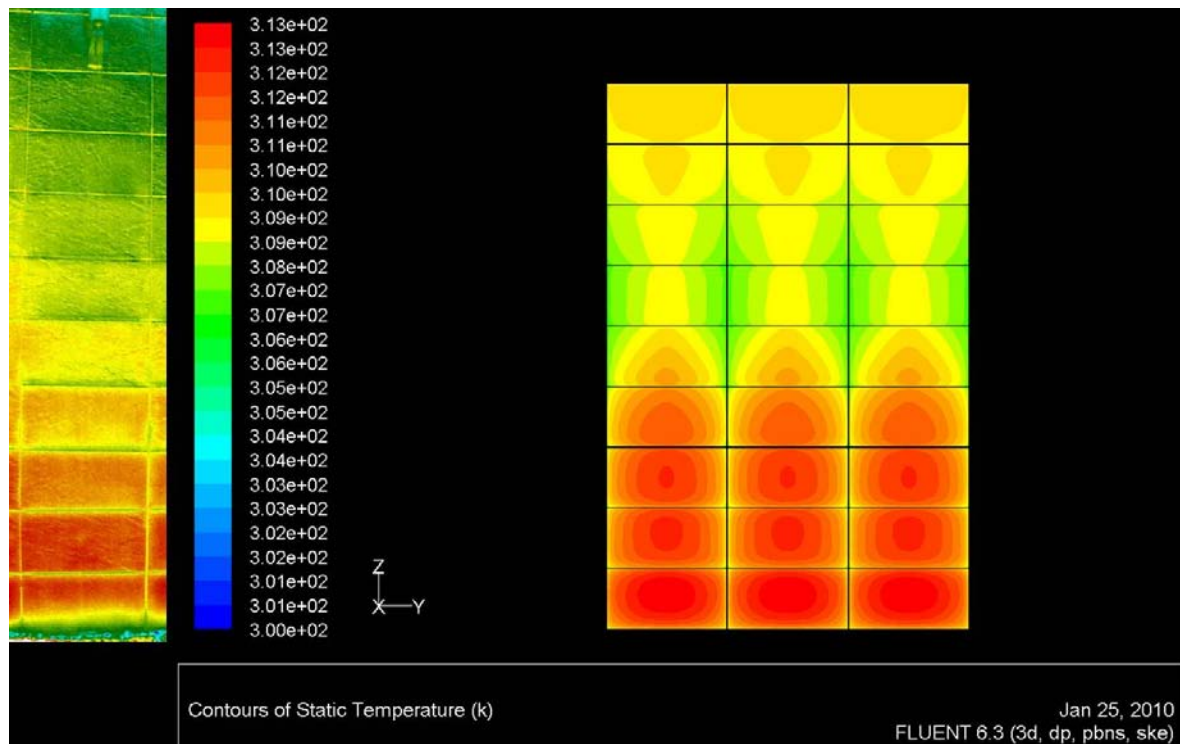


Fig. 6.1. Comparación del primer modelo 2D, derecha, con la imagen termografica, izquierda

El primer modelo 2D que tenia en cuenta este cambio daba resultados satisfactorio a nivel de descripción general de los fenómenos característico del comportamiento de la fachada ventilada. Figura 6.2..

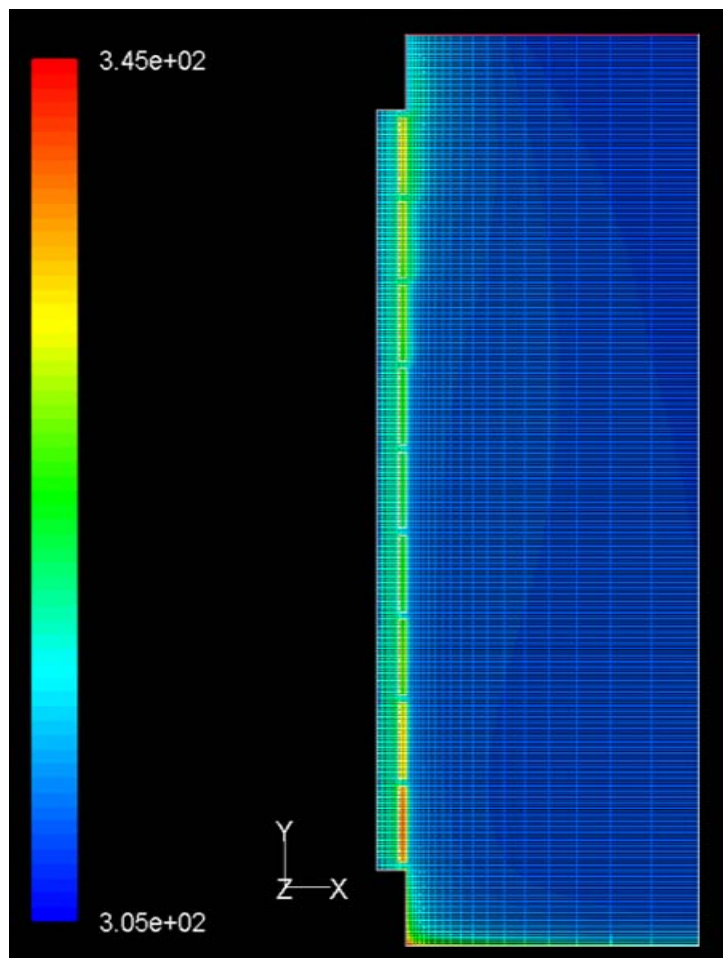


Fig. 6.2. Simulación 2D de la pared ventilada de juntas abiertas considerando la altura total.

A partir de este nuevo modelo se obtuvieron mejores resultados que se pueden ver tanto en el contraste de las temperaturas exteriores de las plaquetas con las termografías, Figura 6.3., como en el de las temperaturas para el día tipo de verano, Figura 6.4a. y b. y de invierno, Figuras 6.5a. y b..

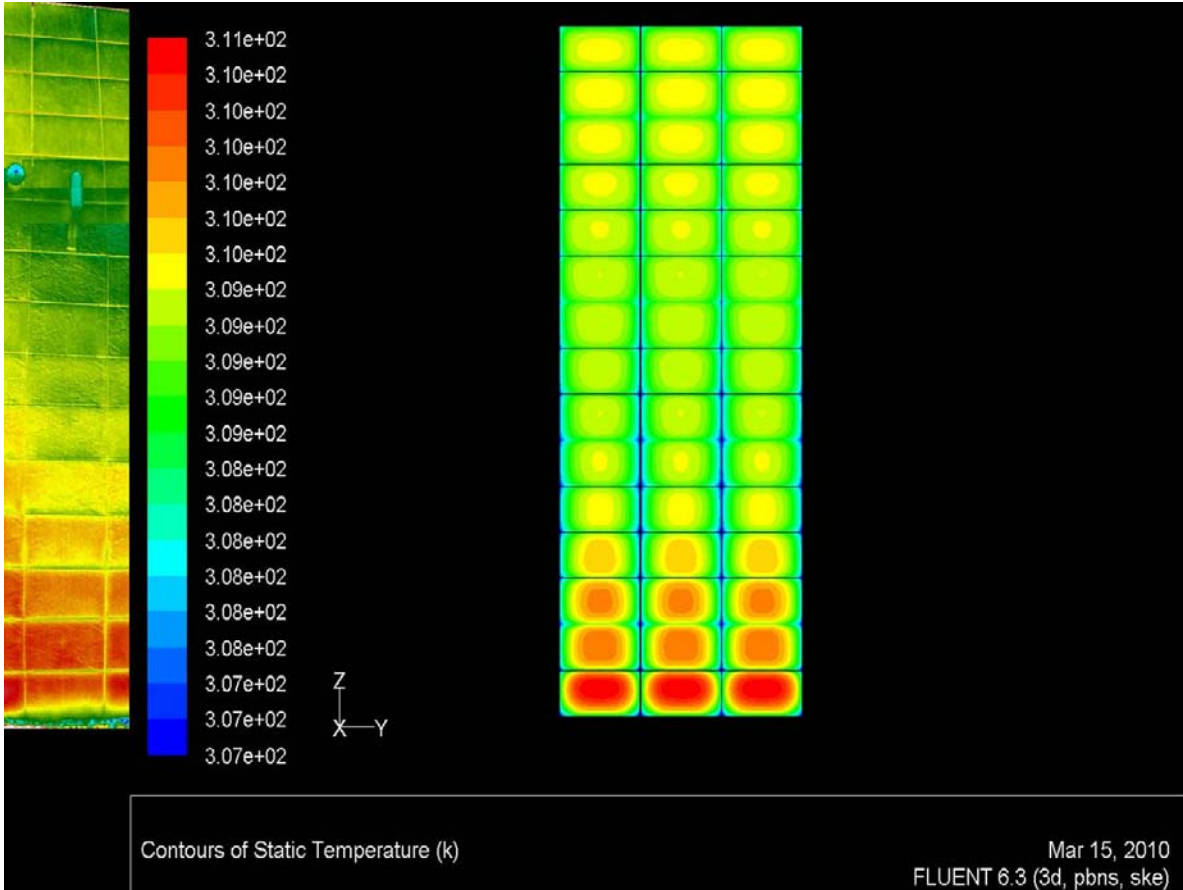


Fig. 6.3. Comparación del modelo 3D, derecha, con la imagen termografica, izquierda

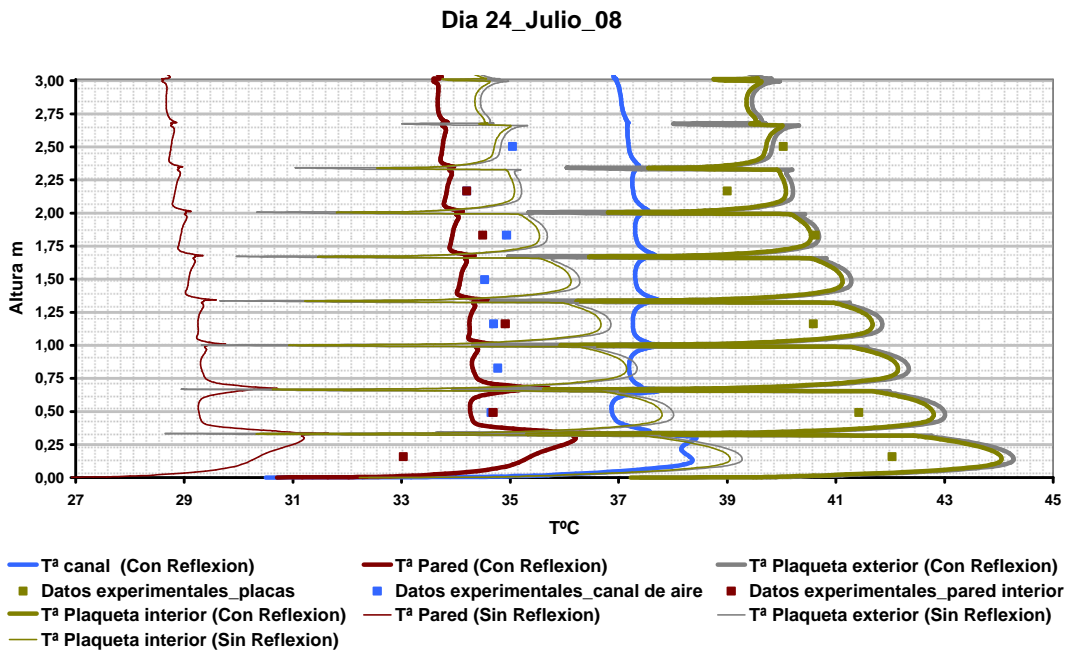


Fig. 6.4a. Comparación de datos experimentales de temperaturas con datos de la simulación, día tipo de verano.

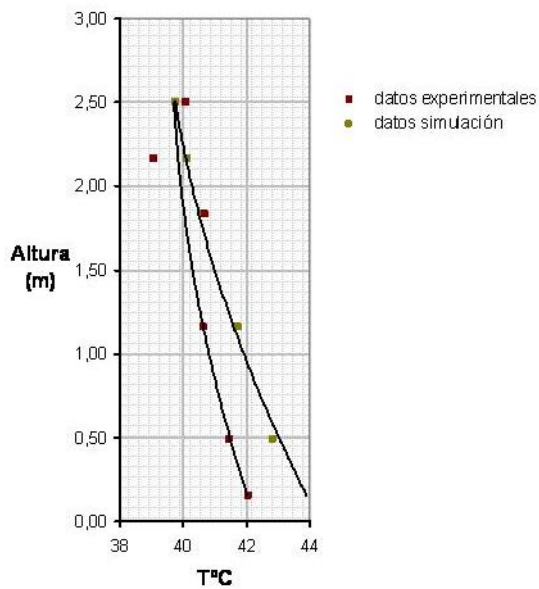


Fig. 6.4b. Líneas de tendencias de las comparaciones de los datos en el día tipo de verano.

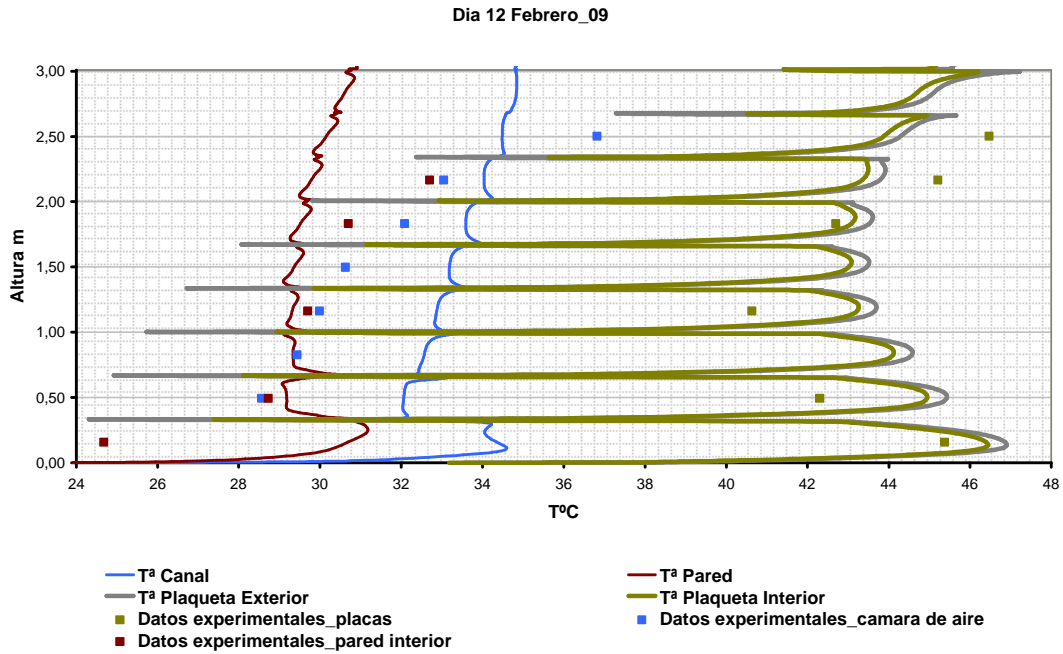


Fig. 6.5a. Comparación de datos experimentales de temperaturas con datos de la simulación, día tipo de invierno.

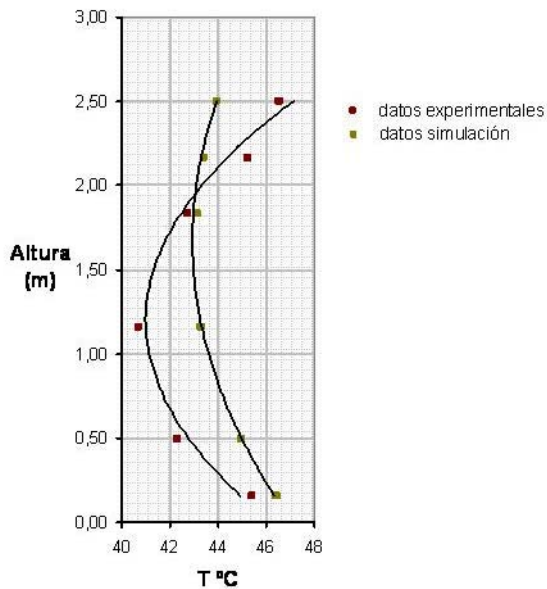


Fig. 6.5b. Líneas de tendencias de las comparaciones de los datos en el día tipo de invierno.

En la grafica se muestran en líneas finas los datos de simulación obtenido sin tener en cuenta del efecto de reflexión desde el suelo y en líneas gordas las simulaciones que si tienen en cuenta este fenómeno. Los puntos representan los datos recogidos experimentalmente.

De estas líneas y después de haber trazado las respectivas líneas de tendencia de las dos series de datos, se encuentra que el comportamiento es satisfactorio y que los resultados de los modelos se acercan muchos a los experimentales, la diferencia que se genera entre ellos es probablemente debida a rangos de errores no tenido en consideración y probablemente a una sobrestimación por parte de los modelos de las radiaciones incidentes.

Temperaturas del aire interior del fluido

La temperatura del aire en el interior del canal se estima, a través de las temperaturas del fluido para diferentes alturas.

Es conocido que el perfil horizontal de temperaturas a ciertas alturas del canal es decreciente respecto a la temperatura de la superficie interior.

El canal de aire tiene una anchura de 4 cm y en la Figura 6.4. se representan los perfiles de las temperaturas del canal a varias alturas del modelo y esto es el esperado, de forma que el aire interior va ganando temperatura, según va ascendiendo por el canal debido al intercambio convectivo con la pared interior.

Temperaturas de la pared interior

En el caso de la pared interior se dispone de datos experimentales a diferentes alturas, que podrán ser contrastados con las estimaciones teóricas de los modelos.

Estas series de datos se representan en Figura 6.4., ambos modelos sobrestiman la temperatura de la superficie de la pared interior.

La ganancia y la pérdida de temperatura al amanecer y atardecer, muestran pendientes similares tanto en la serie experimental como en los modelos, lo que indica que los procesos de transferencia de calor que reproducen en la pared interior quedan bien descritos en el modelo.

En todos los casos, la temperatura medida experimentalmente a mayor altura respecto al suelo presenta valores más bajas respecto a las cercanas al suelo. Esto es debido a la radiación producida por el suelo que se calienta mucho y refleja contra la pared.

6.3 Análisis de los resultados.

El análisis de los modelos propuestos comienza con el cálculo de la serie de datos correspondiente a las variables de validación.

En las figuras anteriores se muestran los datos estimados para los modelos, frente a los experimentales. Se ha marcado con una línea el comportamiento ideal de los modelos, y los resultados experimentales a través de puntos. Se muestran los datos experimentales y estimados por los dos modelos para las plaquetas, el aire del canal y la pared interior. En ambos casos los ajustes de ambos modelos son muy satisfactorios y similares.

En el caso de las temperaturas de las plaquetas, ambos modelos tienen un comportamiento similar y satisfactorio en todos los rangos de valores. El modelo 2D presenta buenos resultados, pero el modelo 3D es lo que mejor se ajusta a los resultados de las termografías dado que se puede apreciar la variación de la temperatura en toda la superficie de la plaquetas.

La temperatura de la pared interna queda descrita de forma aceptable por los dos modelos, aunque claramente el modelo 3D ofrece mejores resultados.

6.4 Discusión.

Las variables de validación elegidas han sido aquellas que interactúan directamente con el canal de aire y las plaquetas de la fachada y por tanto participan en la estimación de la descripción energética del sistema de fachada ventilada. Al no tener medidas directas del caudal de aire, la variable de validación es la temperatura de aire en el interior del canal, y de superficie en las plaquetas y en la pared interior.

La inercia térmica en los modelos de la superficie de las plaquetas es despreciable puesto que los resultados de ambos modelos son similares. Los resultados para la temperatura de las plaquetas son aceptables para ambos modelos.

El incremento de temperatura del aire en el interior del canal, es el factor determinante del caudal que se producirá.

6.5 Análisis de los resultados.

Como conclusión del análisis de validación realizado sobre el modelo bidimensional desarrollado desde el principio, y el modelo tridimensional desarrollado siguiendo el esquema básico del anterior modelo reportado en la bibliografía, al cual se han incorporado nuevas expresiones para la estimación de la radiación, se concluye:

- El modelo bidimensional es capaz de describir el comportamiento del cerramiento fachada ventilada sin considerar la inercia térmica de las plaquetas. El modelo 3D ofrece una descripción similar de estos elementos, pero aportando mayor información como es el efecto borde.
- Gracias a la introducción de la radiación en el suelo en los modelo se ha podido averiguar que era esta la causa de la variación de temperatura en las plaquetas, distinta de lo esperado, en el modelo 2D se ve claramente como la temperatura más alta se encuentran a niveles más bajos. Esto se refleja también en las superficie entera de las plaquetas que reproducen satisfactoriamente los resultados dados de las termografías.
- La temperatura al interior del canal de la fachada ventilada queda bien descrita por ambos modelos.
- Se nota una sobrestimación de la temperatura de la superficie de la pared interior en ambos los modelos.

7. Conclusiones finales y trabajos futuros.

Para finalizar se presentan de una forma resumida las principales conclusiones alcanzadas, así como algunas recomendaciones sobre posibles estudios futuros.

Conclusiones

Se han considerado dos enfoques distintos y complementarios sobre el estudio del comportamiento de la fachada ventilada de juntas abiertas: numérico y experimental. A partir de ellos se ha profundizado en el objetivo general del trabajo de investigación desarrollado y presentado en esta memoria de tesis que es: aportar una metodología de evaluación energética de fachadas ventiladas de juntas abiertas.

Se han analizado las condiciones e hipótesis pertinentes, tanto al análisis experimental como a las simulaciones numéricas, identificándose las correspondientes limitaciones de cada técnica. Ambas se han particularizado para el estudio de una fachada ventilada concreta cuyas dimensiones y composición se describen en Anexo II.1 y cuya característica peculiar es de empezar de una cuota de 0.005 m del suelo.

Para la realización de los experimentos se han utilizado los ficheros de datos disponibles de la monitorización de la fachada ventilada de juntas abiertas del edificio CIESOL, ubicado en la Universidad de Almería. Este edificio es uno de los cinco contenedores-demostradores de investigación dentro del Proyecto Singular Estratégico de Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL) que se está desarrollando por un consorcio de empresas e instituciones y coordinado por la UiE3 del CIEMAT.

De los resultados experimentales se pueden resaltar los siguientes:

- En el caso del revestimiento exterior, las plaquetas cerámicas, se nota una tendencia inversa a la esperada, las temperaturas máximas se alcanzan en el primero nivel de plaquetas esto debido probablemente a la radiación por reflexión que recibe del suelo, siendo esto de grava blanca y entonces con alto poder reflectante. También se observa que las plaquetas no tienen inercia térmica apreciable, dato que su temperatura evoluciona de forma paralela a la temperatura ambiente.
- La medidas de temperatura del fluido, muestra el gradiente vertical de las temperaturas en el centro del canal, se nota que aquí si se produce un aumento de la temperatura con la altura.
- En el muro de la pared interior, construida de ladrillo de 1/2 pies, hay que tener en consideración que los PT100 (sensores de temperatura superficial) están posicionados arriba del aislante, se observa un aumento de las temperaturas a la mitad de la pared.
- La evolución de las temperaturas para las plaquetas en el día tipo de invierno es mucho más parecida al esperado, dado que aumenta con el altura, además va aumentando con el crecer de la temperatura exterior, aunque con valores mucho más elevados que coinciden con los valores de radiación en fachada.
- En la cámara de aire las temperaturas del fluido se bajan respecto a las de las plaquetas de casi 10° C, y como previsto en el nivel más alto del

canal las temperaturas suben notablemente debida al efecto chimenea que se genera.

- En la pared interior, el hecho que las temperaturas estén siempre por encima de la temperatura ambiente, y que incluso por la noche mantengan una diferencia de temperatura notable, muestra la capacidad de acumular energía térmica en el muro, y su dificultad para cederla.

En cuanto al estudio numérico, se han utilizado los medios de cálculo disponibles en el mismo CIEMAT, empleándose para tal fin el programa comercial FLUENT. Se han realizado simulaciones desarrollando un modelo bidimensional y otro tridimensional. Estos modelos han servido para identificar la descripción térmica de la fachada ventilada de juntas abiertas.

La metodología numérica desarrollada se ha aplicado en el caso particular de la fachada ventilada del edificio CIESOL.

Del desarrollo de ambos modelos, las consideraciones más importantes que se pueden resaltar con respecto a los trabajos publicados en la bibliografía y los aspectos imprescindibles a tener en cuenta para obtener el correcto ajuste entre datos teóricos y experimentales, son:

- Hay que tener en cuenta en todo momento el efecto de la radiación incidente en la fachada considerando los ángulos de incidencias;
- Hay que tratar la parte del dominio representante el espacio exterior como un vidrio para poder manejar varias radiaciones, y varios ángulos de incidencias sobre la fachada;

- Hay que tener en cuenta el efecto de la reflexión del suelo;
- Hay que tener en cuenta el efecto de la reflectividad del material de revestimiento exterior, aplicando un valor considerado entre el 40% 60%;
- Hay que tener en cuenta el efecto provocado de la junta horizontal presente a nivel de suelo.

En líneas generales, y aunque la hipótesis de viento en calma constituye una simplificación muy importante respecto al existente en la realidad, los principales fenómenos, en especial los relativos al comportamiento estacionario, han sido modelizados de forma correcta.

Con la doble intención de validar los modelos numéricos y obtener patrones de comportamiento fluidodinámico de una fachada ventilada de juntas abiertas en la presente investigación se ha realizado una validación de los modelos propuestos tanto de forma cualitativa como cuantitativa, a través de datos experimentales y termografías.

Los resultados teóricos obtenidos para el modelo 2D muestran como a través de este modelo los fenómenos experimentalmente observados, como el aumento de la temperatura a niveles más bajos de las plaquetas; aumento de temperatura con el altura del aire en el canal, quedan satisfactoriamente descritos.

En líneas generales, los análisis cuantitativo y cualitativo de los datos numéricos muestran como los fenómenos fluidodinámicos más importantes son correctamente modelizados. El cálculo numérico no estacionario, en combinación con la técnica de mallado, se ha mostrado como una herramienta de gran validez y

utilidad en la investigación del comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas.

De este análisis realizado sobre los modelos 2D y 3D los resultados concretos que se pueden resaltar son:

- La evolución de la temperatura de las plaquetas muestra un comportamiento satisfactorio y los resultados de los modelos se acercan muchos a los experimentales, la diferencia que se genera entre ellos es probablemente debida a rangos de errores no tenidos en consideración y probablemente a una sobrestimación por parte de los modelos de las radiaciones incidentes. En todos los casos, la temperatura medida experimentalmente a mayor altura respecto al suelo presenta valores más bajos respecto a las cercanas al suelo. Esto es debido a la radiación producida por el suelo que se calienta mucho y refleja contra la pared;
- En el canal de aire, es conocido que el perfil horizontal de temperaturas a ciertas alturas del canal es decreciente respecto a la temperatura de la superficie interior. Los perfiles de las temperaturas del canal a varias alturas del modelo es el esperado, de forma que el aire interior va ganando temperatura según va ascendiendo por el canal debido al intercambio convectivo con la pared interior;
- La ganancia y la pérdida de temperatura al amanecer y atardecer, muestran pendientes similares tanto en la serie experimental como en los modelos, lo que indica que los procesos de transferencia de calor que reproducen en la pared interior quedan bien descritos en el

modelo. Ambos modelos sobrestiman la temperatura de la superficie de la pared interior.

En resumen, a partir de los trabajos numérico y experimental realizados se ha llegado a una comprensión más clara sobre cómo es el funcionamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas, así como implementar técnicas de simulaciones para la caracterización de este tipo de cerramiento.

También se ha llegado a conclusiones interesantes sobre el efecto que tiene la separación del suelo y la influencia de la radiación sobre el tipo de material del revestimiento.

Presente y futuro de la investigación en fachadas ventiladas de juntas abiertas

El presente trabajo de investigación aporta una herramienta de evaluación de fachadas ventiladas de juntas abiertas que hasta ahora no existía. Este modelo requiere únicamente de la introducción de las características físicas de las fachadas ventiladas que se desea evaluar, así como series temporales de datos de temperatura ambiente, radiación solar del lugar en el que se quiere considerar la fachada ventilada.

Estos modelos podrían servir de instrumento que permita valorar la idoneidad de utilizar fachadas ventiladas en el diseño de un edificio, estimando el caudal del aire extraído dado un diseño y unas condiciones climatológicas. Como además podrían servir a las industrias fabricantes de este tipo de cerramiento para poder comprobar las temperaturas y las presiones presentes en el canal de aire, datos útiles al fin de poder diseñar y construir bien los perfiles de la estructura portante del revestimiento exterior.

A la vista de la comparación de resultados obtenidos siguiendo las dos vertientes, numérica y experimental, de este trabajo, cabe señalar que se debería profundizar en ambas con el fin de completar algunos aspectos no considerados en este trabajo.

Sería necesario continuar la investigación con un análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño de una fachada ventilada de juntas abiertas que podría abrir un camino para desarrollar una guía de diseño para estos sistemas. Esta guía de diseño debería considerar las diferentes condiciones climáticas y la época del año, para servir dentro de un contexto nacional. A través de la representación en gráficas del caudal del aire medio extraído (nocturno y diurno) en función de los parámetros que caracterizan la fachada ventilada, se podría conocer el comportamiento de una fachada ventilada de juntas abiertas de dimensiones, características y configuraciones concretas, según las diferentes topologías climatológicas consideradas.

A nivel experimental, es necesario continuar las investigaciones con fachadas ventiladas que permitan la variaciones de diferentes parámetros tales como el ancho del canal, área de entrada y de salida, dimensiones de las juntas, etc. De la misma manera, estudio experimental de diferentes configuraciones, tales como plaquetas de distinto material, o sustituidas por módulos fotovoltaicos, o incluso que contemplen un ángulo de inclinación para la fachada, es necesario para aportar diferentes opciones al uso de este sistema en edificios.

Esto hace hincapié a investigaciones que evalúen el impacto en el acondicionamiento térmico de los edificios. Es muy interesante la ventilación que producen, ofreciendo una estrategia de refrigeración muy interesante para edificios de ocupación diurna.

8. Bibliografía.

1. Abdel-Fattah A. Numerical Study of Buoyancy-Opposed Wall Jet Flow. Heat Transfer Research.41(2):137-53.
2. Abraham JP, Sparrow EM. Three-dimensional laminar and turbulent natural convection in a continuously/discretely wall-heated enclosure containing a thermal load. Numerical Heat Transfer Part a-Applications. 2003;44(2):105-25.
3. Acharya S, Baliga BR, Karki K, Murthy JY, Prakash C, Vanka SP. Pressure-based finite-volume methods in computational fluid dynamics. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme. 2007;129(4):407-24.
4. Adam A; Adam A, assignee. Clamp for back-ventilated curtain walling panels centers round punched baseplate with inserted dissimilarly colored lips tensioned to hold panels of variable thickness patent DE19901428-A1. 2000.
5. Afonso C, Oliveira A. Solar chimneys: simulation and experiment. Energy and Buildings. 2000;32(1):71-9.
6. Afonso CFA. Recent advances in building air conditioning systems. Applied Thermal Engineering. 2006;26(16):1961-71.
7. Aguiarl JCR, Midao FS, Almeida VG, Vallim AN, Carvalho MMQ. Simulation and analysis of the energy performance of an office building located in Rio de Janeiro - Brazil. Building Simulation 2007, Vols 1-3, Proceedings. 2007:1765-9.
8. Al-Homoud MS, Abdou AA, Budaiwi IM. Assessment of monitored energy use and thermal comfort conditions in mosques in hot-humid climates. Energy and Buildings. 2009;41(6):607-14.
9. Al-Khawaja MJ. Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation. Applied Thermal Engineering. 2004;24(17-18):2601-10.

10. Allinson D, Medjdoub B, Wilson R. Towards quantitative aerial thermal infrared thermography for energy conservation in the built environment. *Thermosense Xxvii*. 2005;5782:133-44.
11. Anayiotos A, Cheng G, Ito Y, Gray J, Agarwal R. The challenges of imaging based computational fluid dynamics. *Stud Health Technol Inform*. 2004;103:225-32.
12. Andersen KK, Madsen H, Hansen LH. Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations. *Energy and Buildings*. 2000;31(1):13-24.
13. Andersen KT. Theory for natural ventilation by thermal buoyancy in one zone with uniform temperature. *Building and Environment*. 2003;38(11):1281-9.
14. Anderson J. *Computational Fluid Dynamics: the basic with applications*: Mc Graw Hill; 1995.
15. Androutopoulos A, Bloem JJ, van Dijk HAL, Baker PH. Comparison of user performance when applying system identification for assessment of the energy performance of building components. *Building and Environment*. 2008;43:189-96.
16. Arulanandam SJ, Hollands KGT, Brundrett E. A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions. *Solar Energy*. 1999;67(1-3):93-100.
17. Asdrubali F, Bonaut M, Battisti M, Venegas M. Comparative study of energy regulations for buildings in Italy and Spain. *Energy and Buildings*. 2008;40(10):1805-15.
18. Aung W. FULLY DEVELOPED LAMINAR FREE CONVECTION BETWEEN VERTICAL PLATES HEATED ASYMMETRICALLY. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1972;15(8):1577-&.
19. Aung W, Sernas V, Fletcher LS. DEVELOPING LAMINAR FREE CONVECTION BETWEEN VERTICAL FLAT PLATES WITH ASYMMETRIC HEATING. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1972;15(11):2293-&.

20. Aviram DP, Fried AN, Roberts JJ. Thermal properties of a variable cavity wall. *Building and Environment*. 2001;36(9):1057-72.
21. Awbi HB. Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection. *Energy and Buildings*. 1998;28(2):219-27.
22. Ayata T. Investigation of building height and roof effect on the air velocity and pressure distribution around the detached houses in Turkey. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(8-9):1752-8.
23. Bacharoudis E, Vrachopoulos MG, Koukou MK, Margaritis D, Filios AE, Mavrommatis SA. Study of the natural convection phenomena inside a wall solar chimney with one wall adiabatic and one wall under a heat flux. *Applied Thermal Engineering*. 2007;27(13):2266-75.
24. Baeza EJ, Pérez-Parra JJ, Montero JI, Bailey BJ, López JC, Gázquez JC. Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*. 2009;104(1):86-96.
25. Bakier AY. EFFECT OF THERMOPHORESIS ON NATURAL CONVECTION BOUNDARY LAYER FLOW OF A MICROPOLAR FLUID. *Thermal Science*.14(1):171-81.
26. Balocco C. A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy and Buildings*. 2002;34(5):469-75.
27. Balocco C, Colombari M. Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed façade: Non-dimensional analysis. *Energy and Buildings*. 2006;38(1):1-7.
28. Bansal NK, Mathur R, Bhandari MS. A STUDY OF SOLAR CHIMNEY ASSISTED WIND TOWER SYSTEM FOR NATURAL VENTILATION IN BUILDINGS. *Building and Environment*. 1994;29(4):495-500.
29. Bansal NK, Shail, Gaur RC. Application of U and g values for sizing passive heating concepts. *Solar Energy*. 1996;57(5):361-73.

30. Bansal NK, Sodha MS, Sharma AK, Rakshit R. A SOLAR PASSIVE BUILDING FOR HOT ARID ZONES IN INDIA. *Energy Conversion and Management*. 1991;32(1):1-9.
31. Barelli L, Bidini G, Pinchi EM. Proposal of technical constructive obligations to reduce the summer energetic consumptions. *Energy and Buildings*.42(4):401-11.
32. Bastide A, Lauret P, Garde F, Boyer H. Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates - Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural ventilation. *Energy and Buildings*. 2006;38(9):1093-103.
33. Batchelor GK. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge: University of Cambridge; 1967.
34. Bazilian MD, Kamalanathan H, Prasad DK. Thermographic analysis of a building integrated photovoltaic system. *Renewable Energy*. 2002;26(3):449-61.
35. Beccali G, Cellura M, Brano VL, Orioli A. Is the transfer function method reliable in a European building context? A theoretical analysis and a case study in the south of Italy. *Applied Thermal Engineering*. 2005;25(2-3):341-57.
36. Ben Nasr K, Chouikh R, Kerkeni C, Guizani A. Numerical study of the natural convection in cavity heated from the lower corner and cooled from the ceiling. *Applied Thermal Engineering*. 2006;26(7):772-5.
37. Benemann J, Chehab O, Schaar-Gabriel E. Building-integrated PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001;67(1-4):345-54.
38. Bhandari MS, Bansal NK. Solar heat gain factors and heat loss coefficients for passive heating concepts. *Solar Energy*. 1994;53(2):199-208.
39. Bird S, Lightfoot. . *Transport Phenomena* Wiley International; 1960.
40. Bliss RW. Atmospheric radiation near the surface of the ground. *Solar Energy*. 1961;5(3):103-20.

41. Bloem JJ. Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment. *Building and Environment*. 2008;43(2):205-16.
42. Bloem JJ, Martin S. A pseudo dynamic analysis tool for thermal certification of dwellings. *Energy and Buildings*. 2001;33(3):207-12.
43. Boadilla EMFd. La fachada ventilada. Publicación, Primer permio de investigación Fundación Escuela de la Edificación, ortogado por el Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos técnicos e Ingenieros de Edificacion de Madrid.
44. Bojic M, Lukic N. Numerical evaluation of solar-energy use through passive heating of weekend houses in Yugoslavia. *Renewable Energy*. 2000;20(2):207-22.
45. Borgers TR, Akbari H. FREE CONVECTIVE TURBULENT-FLOW WITHIN THE TROMBE WALL CHANNEL. *Solar Energy*. 1984;33(3-4):253-64.
46. Bouchlaghem N. Optimising the design of building envelopes for thermal performance. *Automation in Construction*. 2000;10(1):101-12.
47. Brescia J; Brescia J, assignee. Building integrated photovoltaic conversion system for heating, ventilation and air-conditioning system, has photovoltaic modules integrated within curtain wall elements to transform electromagnetic energy into electrical energy patent US2010071749-A1.
48. Brinkworth BJ. Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts. *Solar Energy*. 2000;69(5):413-20.
49. Brinkworth BJ. A procedure for the routine calculation of laminar free and mixed convection in inclined ducts. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000;21(4):456-62.
50. Brinkworth BJ. Coupling of convective and radiative heat transfer in PV cooling ducts. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*. 2002;124(3):250-5.
51. Brinkworth BJ, Cross BM, Marshall RH, Yang HX. Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy*. 1997;61(3):169-78.

52. Brinkworth BJ, Marshall RH, Ibarahim Z. A validated model of naturally ventilated PV cladding. *Solar Energy*. 2000;69(1):67-81.
53. Brinkworth BJ, Sandberg M. Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays. *Solar Energy*. 2006;80(1):89-103.
54. Burek SAM, Habeb A. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls. *Energy and Buildings*. 2007;39(2):128-35.
55. Cabeza LF, Castell A, Medrano M, Martorell I, Pérez G, Fernández I. Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*. 42(5):630-6.
56. Cai J, Dai X, Fang G, et al.; Hunan Qiuke Heat Resource Tower & Heat, assignee. Complete equipment i.e. high efficient negative pressure refrigerator, for heat pump, has opening of dense solution separated by molecular film processor and connected to anti-frost spraying device of external device by pipeline patent CN101672552-A.
57. Campo A, Landon MD. Design optimization of an air-filled cavity - Control of the constrained maximum temperature at the directly heated vertical wall. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2004;14(5-6):718-33.
58. Canas I, Martin S. Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture. *Building and Environment*. 2004;39(12):1477-95.
59. Cetiner I, Ozkan E. An approach for the evaluation of energy and cost efficiency of glass facades. *Energy and Buildings*. 2005;37(6):673-84.
60. Chansomsak S, Vale B. The Buddhist approach to education: an alternative approach for sustainable education. *Asia Pacific Journal of Education*. 2008;28(1):35-50.
61. Charron R, Athienitis AK. Optimization of the performance of double-facades with integrated photovoltaic panels and motorized blinds. *Solar Energy*. 2006;80(5):482-91.

62. Chatziangelidis K, Bouris D. Calculation of the distribution of incoming solar radiation in enclosures. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(5-6):1096-105.
63. Chen W, Liu W. Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber. *Applied Thermal Engineering*. 2008;28(11-12):1251-8.
64. Chenvidyakarn T, Woods AW. On the natural ventilation of two independently heated spaces connected by a low-level opening. *Building and Environment*.45(3):586-95.
65. Christie DE. VECTORS TENSORS AND BASIC EQUATIONS OF FLUID MECHANICS. *American Mathematical Monthly*. 1965;72(1):97-&.
66. Chui EH, and Raithby, G.D. Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh using the Finite Volume Method. *Num Heat Transfer*. 1993;23:269-88.
67. Ciampi M, Leccese F, Tuoni G. Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings. *Solar Energy*. 2003;75(6):491-502.
68. Ciampi M, Leccese F, Tuoni G. Multi-layered walls design to optimize building-plant interaction. *International Journal of Thermal Sciences*. 2004;43(4):417-29.
69. Ciampi M, Leccese F, Tuoni G. Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. *Solar Energy*. 2005;79(2):183-92.
70. CIDEMCO. Estudio para la caracterización termica de la fachada ventilada Butech, (Gruppo Porcelanosa).
71. Collado Izquierdo R; Ramon Collado-Arquitecto SI, assignee. Double-walled skin construction arrangement for tall buildings, has outer and inner walls comprising of openable panels, and curtains, thermal bridge breaking sections, fire barriers and acoustic insulation between inner and outer walls patent EP1516974-A1. 2005.

72. Collis SS, Ghayour K, Heinkenschloss M, Ulbrich M, Ulbrich S. Optimal control of unsteady compressible viscous flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2002;40(11):1401-29.
73. Cook NJ, Chan P, Wu D, Holder MA. Towards quantitative visualisation of transient surface flow on building models using infrared thermography. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002;90(6):663-73.
74. Cooper P, Hunt GR. The ventilated filling box containing a vertically distributed source of buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics*.646:39-58.
75. Corgriati SP, Perino M, Serra V. Experimental assessment of the performance of an active transparent facade during actual operating conditions. *Solar Energy*. 2007;81(8):993-1013.
76. Corvaro F, de Padova MM, Nardini G, Paoloni R. Monitoring results of a 20 kwp of building integrated photovoltaic system of ancona. *Energy and the Environment 2006, Vol I*. 2006:227-33.
77. Coussirat M, Guardo A, Jou E, Egusquiza E, Cuerva E, Alavedra P. Performance and influence of numerical sub-models on the CFD simulation of free and forced convection in double-glazed ventilated facades. *Energy and Buildings*. 2008;40(10):1781-9.
78. Craig KJ, Venter PJ, de Kock D, Snyman JA. Optimisation of structured grid spacing parameters for separated flow simulation using mathematical optimisation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1999;80(3):221-31.
79. CTE. *Código Técnico de la Edificación*, BOE de 11 de marzo de 2010. 2010.
80. Da Silva FM, Gomes MG. Gap inner pressures in multi-storey double skin facades. *Energy and Buildings*. 2008;40(8):1553-9.
81. Dai A, Garcia MH. Buoyancy-Driven Flow in a Two-Story Compartment. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*. 2009;135(7):738-42.
82. Dalenback JO. Solar energy in building renovation. *Energy and Buildings*. 1996;24(1):39-50.

83. Davidovic D, Srebric J, Burnett EFP. Modeling convective drying of ventilated wall chambers in building enclosures. *International Journal of Thermal Sciences*. 2006;45(2):180-9.
84. Davis HF, Snider AD. INTRODUCTION TO VECTOR ANALYSIS. 4th EDITION ed. USA; 1979.
85. De Alegría Mancisidor IM, Díaz de Basurto Uruga P, Martínez de Alegría Mancisidor I, Ruiz de Arbulo López P. European Union's renewable energy sources and energy efficiency policy review: The Spanish perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(1):100-14.
86. De la Flor FJS, Domínguez SÁ, Félix JLM, Falcón RG. Climatic zoning and its application to Spanish building energy performance regulations. *Energy and Buildings*. 2008;40(10):1984-90.
87. Deblander JP; Deblander J P, assignee. Internally sited movable window heat insulation|uses movable shutter inside wall cavity which can be moved to double-glazed window space patent FR2564877-A1. 1986.
88. Defer D, Shen J, Lassue S, Duthoit B. Non-destructive testing of a building wall by studying natural thermal signals. *Energy and Buildings*. 2002;34(1):63-9.
89. Delgado-Buscalioni R. Convection patterns in end-heated inclined enclosures. *Physical Review E*. 2001;64(1).
90. Demirbilek FN, Yalciner UG, Ecevit A, Sahmali E, Inanici M. Analysis of the thermal performance of a building design located at 2465 m: Antalya-Saklikent National Observatory guesthouse. *Building and Environment*. 2003;38(1):177-84.
91. Di Maio F, van Paassen AHC. Integration of double facades and ventilation systems in buildings. *Advances in Building Technology, Vols I and II, Proceedings*. 2002:1225-32.
92. Dimoudi A, Androutsopoulos A, Lykoudis S. Summer performance of a ventilated roof component. *Energy and Buildings*. 2006;38(6):610-7.

93. Ding WT, Hasemi YJ, Yamada T. Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney. *Energy and Buildings*. 2005;37(4):411-8.
94. Dit. Documento de idoneidad tecnica:n ° 527/09 - Sistema de revestimiento de fachadas ventiladas con placas ceramicas, FRONTEK PLUS. In: Torroja IdCdICE (ed): Apartado 11.1.5 2009-2014.
95. Dit. Documento de idoneidad tecnica:n ° 528/09 - Sistema de revestimiento de fachadas ventiladas con placas ceramicas. FRONTEK SUPERPLUS. In: Torroja IdCdICE (ed): Apartado 11.1.5, 2009-2014.
96. D'Orazio M. Pareti a cassetta? No grazie. *Modulo*. 1994;201. Mayo.
97. Dos Santos GH, Mendes N. Analysis of numerical methods and simulation time step effects on the prediction of building thermal performance. *Applied Thermal Engineering*. 2004;24(8-9):1129-42.
98. Dougherty BP, Fanney AH, Davis MW. Measured performance of building integrated photovoltaic panels - Round 2. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*. 2005;127(3):314-23.
99. Dounis AI, Caraiscos C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment-A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(6-7):1246-61.
100. Down MJ, Foster MP, McMahon TA. Experimental verification of a theory for ventilation of livestock buildings by natural convection. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1990/4//;45:269-79.
101. Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. *Solar Energy*. 1982;28(1):85-.
102. Dymond C, Kutscher C. Development of a flow distribution and design model for transpired solar collectors. *Solar Energy*. 1997;60(5):291-300.
103. Eckert ERG, Goldstein RJ, Ibele WE, et al. Heat transfer--a review of 1994 literature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997;40(16):3729-804.

104. Egan V, Confrey TW, Newport D, Lacarac V. MEASUREMENT OF TRANSIENT NATURAL CONVECTION IN NON-VENTILATED AIRCRAFT COMPARTMENTS. *Ht2008: Proceeding of the Asme Summer Heat Transfer Conference, Vol 3.* 2009:249-59.
105. Ezzouhri R, Joubert P, Penot F, Mergui S. Large Eddy simulation of turbulent mixed convection in a 3D ventilated cavity: Comparison with existing data. *International Journal of Thermal Sciences.* Noviembre 2009;48(11):2017-24.
106. Faggembauu D, Costa M, Soria M, Oliva A. Numerical analysis of the thermal behaviour of ventilated glazed facades in Mediterranean climates. Part I: development and validation of a numerical model. *Solar Energy.* 2003;75(3):217-28.
107. Fang XD, Li YZ. Numerical simulation and sensitivity analysis of lattice passive solar heating walls. *Solar Energy.* 2000;69(1):55-66.
108. Fang XD, Yang TT. Regression methodology for sensitivity analysis of solar heating walls. *Applied Thermal Engineering.* 2008;28(17-18):2289-94.
109. Fara L, Dabija AM, Fara S, Finta D, Lancu M, Paulescu M. BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS (BIPV) IN ROMANIA. *Energy and the Environment 2008, Vol 2.* 2008:237-46.
110. Flourentzou F, vanderMaas J, Roulet CA. Experiments in natural ventilation for passive cooling. *17th Aivc Conference - Optimum Ventilation and Air Flow Control in Building, Proceedings, Vols 1 and 2.* 1996:121-34.
111. Fossa M, Menezo C, Leonardi E. Experimental natural convection on vertical surfaces for building integrated photovoltaic (BIPV) applications. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2008;32(4):980-90.
112. Foster MP, Down MJ. Ventilation of livestock buildings by natural convection. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 1987/8//;37(3-4):1-13.
113. Fraisse G, Johannes K, Trillat-Berdal V, Achard G. The use of a heavy internal wall with a ventilated air gap to store solar energy and improve summer comfort in timber frame houses. *Energy and Buildings.* 2006;38(4):293-302.

114. Frida B. Facciate ventilate : architettura, prestazioni e tecnologia: Alinea; 2006.
115. Friling N, Jimenez MJ, Bloem H, Madsen H. Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules. *Energy and Buildings*. 2009;41(10):1051-7.
116. Friling N, Jiménez MJ, Bloem H, Madsen H. Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules. *Energy and Buildings*. 2009;41(10):1051-7.
117. Frutos B. , Olaya M. EL SISTEMA DE FACHADA TRASVENTILADA COMO ELEMENTO DE CONTRIBUCIÓN AL CONTROL DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA EN EL CERRAMIENTO DEL EDIFICIO. Frío-calor y aire acondicionado. 2005;372:42-4.
118. Fuliotto R, Cambuli F, Mandas N, Bacchin N, Manara G, Chen QY. Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building facade. *Energy and Buildings*.42(1):23-8.
119. Fuliotto R, Cambuli F, Mandas N, Bacchin N, Manara G, Chen QY. Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building facade. *First International Conference on Building Energy and Environment, Proceedings Vols 1-3*. 2008:1677-84.
120. Fung TYY, Yang H. Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings. *Energy and Buildings*. 2008;40(3):341-50.
121. G. Oliveti NA, y S. Ruffolo. Experimental investigation on thermal radiation exchange of outdoors surfaces. *Building and Environment*. 2003;38:83-9.
122. Gan G. Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics. *Energy and Buildings*. 1995;23(2):83-93.
123. Gan G, Riffat SB. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 1998;18(12):1171-87.

124. Gan GH. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy and Buildings*. 1998;27(1):37-43.
125. Gan GH. Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energy and Buildings*. 2006;38(5):410-20.
126. García JO, Gago EJ, Bayo JA, Montes GM. The use of solar energy in the buildings construction sector in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007;11(9):2166-78.
127. Garde F, Mara T, Lauret AP, Boyer H, Cellaire R. Bringing simulation to implementation: Presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates. *Solar Energy*. 2001;71(2):109-20.
128. Gavan V, Woloszyn M, Kuznik F, Roux JJ. Experimental study of a mechanically ventilated double-skin facade with venetian sun-shading device: A full-scale investigation in controlled environment. *Solar Energy*.84(2):183-95.
129. González M., E. Blanco, J.L. Río, J. Pistono, San-Juan C. Numerical study on thermal and fluid dynamic behaviour of an open-joint ventilated façade. PLEA 2008. Dublin, 2008.
130. González M., E. Blanco, Pistono J. Adjusting an energy simulation model by means of CFD techniques to analyze open-joint ventilated façade performance. WREC-X. Glasgow, 2008.
131. Gorobets A, Trias FX, Soria M, Oliva A. A scalable parallel Poisson solver for three-dimensional problems with one periodic direction. *Computers & Fluids*.39(3):525-38.
132. Gratia E, De Herde A. Optimal operation of a south double-skin facade. *Energy and Buildings*. 2004;36(1):41-60.
133. Gratia E, De Herde A. Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin facade. *Energy and Buildings*. 2004;36(11):1139-52.

134. Gratia E, De Herde A. Is day natural ventilation still possible in office buildings with a double-skin facade? *Building and Environment*. 2004;39(4):399-409.
135. Gratia E, De Herde A. Optimal operation of a south double-skin facade. *Energy and Buildings*. 2004;36(1):41-60.
136. Gratia E, De Herde A. Natural ventilation in a double-skin facade. *Energy and Buildings*. 2004;36(2):137-46.
137. Gratia E, De Herde A. Is day natural ventilation still possible in office buildings with a double-skin facade? *Building and Environment*. 2004;39(4):399-409.
138. Gratia E, De Herde A. Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin facade. *Solar Energy*. 2007;81(4):435-48.
139. Gratia E, De Herde A. Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin? *Energy and Buildings*. 2007;39(5):605-19.
140. Gratia E, De Herde A. The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. *Energy and Buildings*. 2007;39(3):364-73.
141. Gratia E, De Herde A. Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin facade. *Solar Energy*. 2007;81(4):435-48.
142. Gratia E, De Herde A. Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin? *Energy and Buildings*. 2007;39(5):605-19.
143. Gray DD, Giorgini A. VALIDITY OF BOUSSINESQ APPROXIMATION FOR LIQUIDS AND GASES. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1976;19(5):545-51.
144. Gresho PM. INCOMPRESSIBLE FLUID-DYNAMICS - SOME FUNDAMENTAL FORMULATION ISSUES. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1991;23:413-53.
145. Griffith BT, Arasteh D. Buildings research using infrared imaging radiometers with laboratory thermal chambers. *Thermosense Xxi*. 1999;3700:502-13.

146. Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*. 1998;29(1):1-9.
147. Guardo A, Coussirat M, Egusquiza E, Alavedra P, Castilla R. A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Facades in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*. 2009;41(5):534-42.
148. Gutierrez G, Aponte J. DEVELOPMENT OF A PASSIVE COOLING PANEL FOR RESIDENTIAL BUILDINGS, INTEGRATED INTO A NOVEL "MAGNETIC/PCM" GROUND COUPLED FLAT HEAT PIPE. *Imece 2008: Heat Transfer, Fluid Flows, and Thermal Systems, Vol 10, Pts a-C*. 2009:1643-7.
149. Haase M, Andresen I, Dokka TH. THE ROLE OF ADVANCED INTEGRATED FACADES IN THE DESIGN OF SUSTAINABLE BUILDINGS. *Journal of Green Building*. 2009;4(1):76-98.
150. Haase M, da Silva FM, Amato A. Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. *Energy and Buildings*. 2009;41(4):361-73.
151. Haggag MA. Building skin and energy efficiency in a hot climate with particular reference to Dubai, UAE. *Energy and Sustainability*. 2007;105:287-97.
152. Hamza N. Double versus single skin facades in hot and areas. *Energy and Buildings*. 2008;40(3):240-8.
153. Han J, Lu L, Yang HX. Thermal behavior of a novel type see-through glazing system with integrated PV cells. *Building and Environment*. 2009;44(10):2129-36.
154. Hänel G, Weidert D, Busen R. Absorption of solar radiation in an urban atmosphere. *Atmospheric Environment Part B Urban Atmosphere*. 1990;24(2):283-92.
155. Haralambopoulos DA, Paparsenos GF. Assessing the thermal insulation of old buildings - The need for in situ spot measurements of thermal resistance

- and planar infrared thermography. *Energy Conversion and Management*. 1998;39(1-2):65-79.
156. Hattori Y, Tsuji T, Nagano Y, Tanaka N. Turbulence characteristics of natural-convection boundary layer in air along a vertical plate heated at high temperatures. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2006;27(3):445-55.
 157. Heiselberg P, Kalyanova O, Jensen RL. Measurement and modelling of air flow rate in a naturally ventilated double skin facade. *First International Conference on Building Energy and Environment, Proceedings Vols 1-3*. 2008:1763-71.
 158. Henry D, BenHadid H. Multiple flow transitions in a box heated from the side in low-Prandtl-number fluids. *Physical Review E*. 2007;76(1).
 159. Heras Celemin MR, Marco Montoro J. Comportamiento energetico de edificios solares pasivos. Plan de monitorizacion del Instituto de Energias Renovables. Madrid (Spain): Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas (CIEMAT); 1990.
 160. Hestnes AG. Building integration of solar energy systems. *Solar Energy*. 1999;67(4-6):181-7.
 161. Hien WN, Wang LP, Chandra AN, Pandey AR, Wei XL. Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. *Energy and Buildings*. 2005;37(6):563-72.
 162. Hoermann A; Creton Ag, assignee. Device for back-ventilated faade has complementary shaped dovetails on outer sides of side walls of double U-shaped profile and same distance from cross web to allow for temperature patent DE10129824-A1. 2003.
 163. Hoffman KA. *Computational fluid dynamics for engineers*. Austin, USA: Education System; 1989.
 164. Holford JM, Hunt GR. Fundamental atrium design for natural ventilation. *Building and Environment*. 2003;38(3):409-26.

165. Hollick JC. World's largest and tallest solar recladding. *Renewable Energy*. 1996;9(1-4):703-7.
166. Hosangadi A, Ahuja V. Numerical study of cavitation in cryogenic fluids. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme*. 2005;127(2):267-81.
167. Hoseggen R, Wachenfeldt BJ, Hanssen SO. Building simulation as an assisting tool in decision making - Case study: With or without a double-skin facade? *Energy and Buildings*. 2008;40(5):821-7.
168. Hughes TJR, Scovazzi G, Tezduyar TE. Stabilized Methods for Compressible Flows. *Journal of Scientific Computing*. 43(3):343-68.
169. Hunt GR, Linden PF. Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001;426:355-86.
170. Ierley GR, Kerswell RR, Plasting SC. Infinite-Prandtl-number convection. Part 2. A singular limit of upper bound theory. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006;560:159-227.
171. Itohagi T, Shin BR. FINITE-DIFFERENCE SCHEMES FOR STEADY INCOMPRESSIBLE NAVIER-STOKES EQUATIONS IN GENERAL CURVILINEAR COORDINATES. *Computers & Fluids*. 1991;19(3-4):479-88.
172. Infield D, Mei L, Eicker U. Thermal performance estimation for ventilated PV facades. *Solar Energy*. 2004;76(1-3):93-8.
173. Infield DG, Mei L, Lee WM, Loveday DL. Thermal aspects of building integrated PV systems. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vols a-C*. 2003:2354-7.
174. Ishikawa N, Kanai M, Hide I, et al. Development of building-integrated PV modules using color solar cells for various exterior walls. *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*. 1997:1289-92.

175. Ismail KAR, Henriquez JR. Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005;48(3-4):461-75.
176. Ismail KAR, Salinas CT, Henriquez JR. A comparative study of naturally ventilated and gas filled windows for hot climates. *Energy Conversion and Management*. 2009;50(7):1691-703.
177. Ji Y, Cook MJ, Hanby V. CFD modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium. *Building and Environment*. 2007;42(3):1158-72.
178. Ji Y, Cook MJ, Hanby VI, Infield DG, Loveday DL, Mei L. CFD modelling of Double-Skin Facades with venetian blinds. *Building Simulation 2007, Vols 1-3, Proceedings*. 2007:1491-8.
179. Jiménez MJ, Heras MR. Application of multi-output ARX models for estimation of the U and g values of building components in outdoor testing. *Solar Energy*. 2005;79(3):302-10.
180. Jimenez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. *Building and Environment*. 2008;43:152-62.
181. Jiménez MJ, Madsen H, Bloem JJ, Dammann B. Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules. *Energy and Buildings*. 2008;40(2):157-67.
182. Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. *Solar Energy*. 2008;82(7):573-87.
183. Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value. *Building and Environment*. 2009;44(2):361-7.
184. Jiru TE, Haghghat F. Modeling ventilated double skin facade - A zonal approach. *Energy and Buildings*. 2008;40(8):1567-76.
185. Johnson C. ARCHITECTURE AND ENERGY - STEIN,RA. *Progressive Architecture*. 1979;60(4):156-.

186. Jordan JZ. Network method to study the transient heat transfer problem in a vertical channel with viscous dissipation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2006;33(9):1079-87.
187. Jouhaud JC, Montagnac M, Tournette L. A multigrid adaptive mesh refinement strategy for 3D aerodynamic design. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2005;47(5):367-85.
188. Judkoff R, Neymark J. Model validation and testing: The methodological foundation of ASHRAE standard 140. *ASHRAE Transactions* 2006, Vol 112, Pt 2. 2006;112:367-76.
189. Kabre C. WINSHADE: A computer design tool for solar control. *Building and Environment*. 1999;34(3):263-74.
190. Kalita JC, Gupta MM. A streamfunction-velocity approach for 2D transient incompressible viscous flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 62(3):237-66.
191. Kalyanova O, Jensen RL, Heiselberg P. Empirical validation data sets for double skin facade models. *First International Conference on Building Energy and Environment, Proceedings Vols 1-3*. 2008:2273-80.
192. Karadag R. New approach relevant to total heat transfer coefficient including the effect of radiation and convection at the ceiling in a cooled ceiling room. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(8-9):1561-5.
193. Kasayapanand N. A computational fluid dynamics modeling of natural convection in finned enclosure under electric field. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(1):131-41.
194. Kasten F, and G. Czeplak. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*. 1980;24:177-89.
195. Kaushik S, Rubin SG. INCOMPRESSIBLE NAVIER-STOKES SOLUTIONS WITH A NEW PRIMITIVE VARIABLE SOLVER. *Computers & Fluids*. 1995;24(1):27-40.
196. Kaye NB, Ji Y, Cook MJ. Numerical simulation of transient flow development in a naturally ventilated room. *Building and Environment*. 2009;44(5):889-97.

197. Kazansky S, Dubovsky V, Ziskind G, Letan R. Chimney-enhanced natural convection from a vertical plate: experiments and numerical simulations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003;46(3):497-512.
198. Khalifa AJN, Marshall RH. VALIDATION OF HEAT-TRANSFER COEFFICIENTS ON INTERIOR BUILDING SURFACES USING A REAL-SIZED INDOOR TEST CELL. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1990;33(10):2219-36.
199. Kim YM, Kim SY, Shin SW, Jang-Yeul S. Contribution of natural ventilation in double skin envelope on heating load reduction in winter. *First International Conference on Building Energy and Environment, Proceedings Vols 1-3*. 2008:1685-91.
200. Koinakis CJ, Sakellaris JK. Upgrading the energy performance of office buildings in Greece - Trends and potentials. *Proceedings of the 2nd Wseas/lasme International Conference on Energy Planning, Energy Saving, Environmental Education*. 2008:153-9.
201. Koleshko SB, Lapin IV, Chumakov YS. Turbulent free-convection boundary layer on a vertical heated plate: Regularities of the temperature layer. *High Temperature*. 2005;43(3):429-40.
202. Kondratyev. *Radiation in the Atmospher*. Academic Press. 1969.
203. Kragh M. Mechanically ventilated double skin facades. *Advances in Building Technology, Vols I and li, Proceedings*. 2002:1233-40.
204. Krausse B, Cook M, Lomas K. Environmental performance of a naturally ventilated city centre library. *Energy and Buildings*. 2007;39(7):792-801.
205. Krauter S, Araujo RG, Schroer S, et al. Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation. *Solar Energy*. 1999;67(4-6):239-48.
206. Kumar JP, Umavathi JC, Pop I, Biradar BM. Fully Developed Mixed Convection Flow in a Vertical Channel Containing Porous and Fluid Layer with Isothermal or Isoflux Boundaries. *Transport in Porous Media*. 2009;80(1):117-35.

207. Kuznik F, Rusaouen G. Numerical prediction of natural convection occurring in building components: A double-population lattice Boltzmann method. Numerical Heat Transfer Part a-Applications. 2007;52(4):315-35.
208. Lakshminarayana B. AN ASSESSMENT OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC TECHNIQUES IN THE ANALYSIS AND DESIGN OF TURBOMACHINERY - THE 1990 FREEMAN SCHOLAR LECTURE. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme. 1991;113(3):315-52.
209. Launder BE, Spalding DB. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.
210. Launder BE, Spalding DB. The numerical computation of turbulent flows. Comput Methods Appl Mech Eng. 1990:269-89.
211. Leao M, Huckemann V, Leao EB, Fisch MN, Kuchen E. Energy efficiency of double skin facades: an approach to Brazilian climates. Bauphysik. 2009;31(6):366-73.
212. Li DHW, Lam JC, Lau CCS. A new approach for predicting vertical global solar irradiance. Renewable Energy. 2002;25(4):591-606.
213. Li DHW, Lam TNT. An analysis of building energy performances and benefits using solar facades. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy. 2008;222(A3):299-308.
214. Li X; Li X, assignee. Method for controlling thermostat installed in carriage of vehicle, involves cooling carriage by refrigeration module, after receiving instruction from control unit connected to power supply end of battery patent CN101654055-A.
215. Li ZJ, Yao W, Lee S, Lee C, Yang ZY. Application of infrared thermography technique in building finish evaluation. Journal of Nondestructive Evaluation. 2000;19(1):11-9.
216. Lorente S. Heat losses through building walls with closed, open and deformable cavities. International Journal of Energy Research. 2002;26(7):611-32.

217. Lu L, Yang HX. A study on simulations of the power output and practical models for building integrated photovoltaic systems. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*. 2004;126(3):929-35.
218. Majdandzic L, Sauer DU. Project of a self-sufficient solar building on the island of Krk - Croatia. *Energy and the Environment* 2002, Vol I. 2002:85-90.
219. Manz H. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of facade elements. *Energy and Buildings*. 2003;35(3):305-11.
220. Manz H. Total solar energy transmittance of glass double facades with free convection. *Energy and Buildings*. 2004;36(2):127-36.
221. Manz H, Frank T. Thermal simulation of buildings with double-skin facades. *Energy and Buildings*. 2005;37(11):1114-21.
222. Manz H, Schaelin A, Simmler H. Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double facades. *Building and Environment*. 2004;39(9):1023-33.
223. Manz H, Simmler H. Experimental and numerical study of a mechanically ventilated glass double facade with integrated shading device. *Research in Building Physics*. 2003:519-26.
224. Marigorta B, Tajadura B. *Ánalysis de incertidumbre en mecania de fluidos*. Universidad de Oviedo, 1994.
225. Marti-Herrero J, Heras MR. Evaluacion de modelos fisicos para describir el comportamiento energetico de una chimenea solar. XXVIII Semana Nacional de Energia Solar. Mexico, 2004.
226. Marti-Herrero J, Heras MR. Dynamic thermal simulation of a solar chimney with PV moduls. International Conference "Pasive and Low Energy Cooling for the Built Environmet. Santorini, Greece, May, 2005.
227. Martínez-Durbán M, Zarzalejo LF, Bosch JL, Rosiek S, Polo J, Batlles FJ. Estimation of global daily irradiation in complex topography zones using digital elevation models and meteosat images: Comparison of the results. *Energy Conversion and Management*. 2009;50(9):2233-8.

228. Mehmood A, Ali A. Analytic Solution of Three-Dimensional Viscous Flow and Heat Transfer Over a Stretching Flat Surface by Homotopy Analysis Method. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*. 2008;130(12).
229. Mei L, Infield D, Eicker U, Fux V. Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade. *Energy and Buildings*. 2003;35(6):605-17.
230. Mei L, Infield DG, Gottschalg R, Loveday DL, Davies D, Berry M. Equilibrium thermal characteristics of a building integrated photovoltaic tiled roof. *Solar Energy*. 2009;83(10):1893-901.
231. Merle X, Alizard F, Robinet JC. Finite difference methods for viscous incompressible global stability analysis. *Computers & Fluids*.39(6):911-25.
232. Ming TZ, Zheng Y, Liu C, Liu W, Pan Y. Simple analysis on thermal performance of solar chimney power generation systems. *Journal of the Energy Institute*.83(1):6-11.
233. Mistriotis A, Bot GPA, Picuno P, Scarascia-Mugnozza G. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1997;85(3-4):217-28.
234. Mittelman G, Alshare A, Davidson JH. A model and heat transfer correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel. *Solar Energy*. 2009;83(8):1150-60.
235. Mohr PJ. The fundamental constants and theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2005;363(1834):2123-37.
236. Mootz F, Bezier JJ. Numerical study of a ventilated facade panel. *Solar Energy*. 1996;57(1):29-36.
237. Moropoulou A, Palyvos JA, Karoglou M, Panagopoulos V. IR based photovoltaic array performance assessment. *Life-Cycle Analysis for New Energy Conversion and Storage Systems*. 2008;1041:43-7.
238. Moshfegh B, Sandberg M. Investigation of fluid flow and heat transfer in a vertical channel heated from one side by PV elements .1. Numerical study. *Renewable Energy*. 1996;8(1-4):248-53.

239. Moureh J, Flick D. Wall air-jet characteristics and airflow patterns within a slot ventilated enclosure. *International Journal of Thermal Sciences*. 2003;42(7):703-11.
240. Moureh J, Flick D. Airflow characteristics within a slot-ventilated enclosure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2005;26(1):12-24.
241. Muneer T, Gul M, Kambezedis H. Evaluation of an all-sky meteorological radiation model against long-term measured hourly data. *Energy Conversion and Management*. 1998;39(3-4):303-17.
242. Naboni E, Ventilated opaque walls. A performance simulation method and assessment of simulated performance. 2007.
243. Nahar NM, Sharma P, Purohit MM. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions. *Building and Environment*. 2003;38(1):109-16.
244. Narahari M. Natural Convection in Unsteady Couette Flow Between Two Vertical Parallel Plates in the Presence of Constant Heat Flux and Radiation. *Proceedings of the 11th Wseas International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering (Macmese '09)*. 2009:73-8.
245. Neeper DA. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Solar Energy*. 2000;68(5):393-403.
246. Neila FJG. *Arquitectura Bioclimatica En Un Entorno Sostenible*. Madrid (Spain): Editorial Munillalera; 2004.
247. Nikolaidis Y, Pilavachi PA, Chletsis A. Economic evaluation of energy saving measures in a common type of Greek building. *Applied Energy*. 2009;86(12):2550-9.
248. Norton T, Grant J, Fallon R, Sun D-W. Improving the representation of thermal boundary conditions of livestock during CFD modelling of the indoor environment. *Computers and Electronics in Agriculture*. In Press, Corrected Proof.

249. Norton T, Grant J, Fallon R, Sun D-W. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*. 2009;103(1):78-99.
250. Oliver M, Jackson T. Energy and economic evaluation of building-integrated photovoltaics. *Energy*. 2001;26(4):431-9.
251. Omer SA, Wilson R, Riffat SB. Monitoring results of two examples of building integrated PV (BIPV) systems in the UK. *Renewable Energy*. 2003;28(9):1387-99.
252. Oztop HF, Varol Y, Koca A. Laminar natural convection heat transfer in a shed roof with or without eave for summer season. *Applied Thermal Engineering*. 2007;27(13):2252-65.
253. Palmero-Marrero AI, Oliveira AC. Evaluation of a solar thermal system using building louvre shading devices. *Solar Energy*. 2006;80(5):545-54.
254. Pantokratoras A. Fully developed laminar free convection with variable thermophysical properties between two open-ended vertical parallel plates heated asymmetrically with large temperature differences. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*. 2006;128(4):405-8.
255. Papaefthimiou VD, Katsanos CO, Vrachopoulos MG, Filios AE, Koukou MK, Layrenti FG. Experimental measurements and theoretical predictions of flowfield and temperature distribution inside a wall solar chimney. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*. 2007;221(1):33-41.
256. Papanicolaou E, Jaluria Y. MIXED CONVECTION FROM A LOCALIZED HEAT-SOURCE IN A CAVITY WITH CONDUCTING WALLS - A NUMERICAL STUDY. *Numerical Heat Transfer Part a-Applications*. 1993;23(4):463-84.
257. Pappas A, Zhai Z. Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow. *Energy and Buildings*. 2008;40(4):466-75.

258. Paricio CPI. La fachada Ventilada y ligera: Bisagra; 2006.
259. Patania F, Gagliano A, F. Nocera AF, T AG. hermo-fluid-dynamic analysis of ventilated facades Energy and Buildings. In Press, Corrected Proof; Available online 11 February 2010.
260. Perago A. Progettare le chiusure verticali: Maggioli Editore; 2006.
261. Perez SE, Tooker BJ, Bussi T. A THEORETICAL-STUDY OF A THERMOSIPHON SOLAR TURBINE. Solar Energy. 1995;54(5):345-50.
262. Perez-Grande I, Meseguer J, Alonso G. Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades. Applied Thermal Engineering. 2005;25(17-18):3163-75.
263. Planas C, Clemente R, Escalona V, et al. Headquarters of the Comision nacional del mercado de valores. Double facade simulation study. Building Simulation 2007, Vols 1-3, Proceedings. 2007:156-60.
264. Rabl A. PARAMETER-ESTIMATION IN BUILDINGS - METHODS FOR DYNAMIC ANALYSIS OF MEASURED ENERGY USE. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme. 1988;110(1):52-66.
265. Radziemska E. Performance Analysis of a Photovoltaic-Thermal Integrated System. International Journal of Photoenergy. 2009.
266. Ridouane EH, Hasnaoui M. Effect of surface radiation on multiple natural convection solutions in a square cavity partially heated from below. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme. 2006;128(10):1012-21.
267. Rogers SE, Kwak D, Kiris C. STEADY AND UNSTEADY SOLUTIONS OF THE INCOMPRESSIBLE NAVIER-STOKES EQUATIONS. Aiaa Journal. 1991;29(4):603-10.
268. Roman E, Martinez V, Jimeno JC, Alonso R, Lbanez P, Elorduizapatarietxe S. Experimental results of controlled PV module for building integrated PV systems. Solar Energy. 2008;82(5):471-80.
269. Rosenfeld M, Kwak D, Vinokur M. A FRACTIONAL STEP SOLUTION METHOD FOR THE UNSTEADY INCOMPRESSIBLE NAVIER-STOKES

- EQUATIONS IN GENERALIZED COORDINATE SYSTEMS. Journal of Computational Physics. 1991;94(1):102-37.
270. Rousseau AN, Albright LD. Computational fluid dynamics study of incomplete air mixing in a slot-ventilated enclosure .1. Flow field characteristics. Numerical Heat Transfer Part a-Applications. 1996;29(8):809-24.
271. Saber MH, Ashtiani HM. Simulation and CFD Analysis of heat pipe heat exchanger using Fluent to increase of the thermal efficiency. Continuum Mechanics, Fluids, Heat.183-9.
272. Saelens D, H.Hens. Experimental evaluation of naturally ventilated active envelopes. International Journal of Thermal Envelopes and Building Science. 2001;25(2):101-27.
273. Safer N, Woloszyn M, Roux JJ. Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind. Solar Energy. 2005;79(2):193-203.
274. Saim R, Abboudi S, Benyoucef B. COMPUTATIONAL ANALYSIS OF TRANSIENT TURBULENT FLOW AND CONJUGATE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN A SOLAR COLLECTOR PANEL WITH INTERNAL, RECTANGULAR FINS AND BAFFLES. Thermal Science.14(1):221-34.
275. Sandberg M, Moshfegh B. Investigation of fluid flow and heat transfer a vertical channel heated from one side by PV elements .2. Experimental study. Renewable Energy. 1996;8(1-4):254-8.
276. Sandberg M, Moshfegh B. Buoyancy-induced air flow in photovoltaic facades - Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules. Building and Environment. 2002;37(3):211-8.
277. Santamouris M, Dascalaki E. Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: the OFFICE project. Building and Environment. 2002;37(6):575-8.
278. Schaap AB, Veltkamp WB. Solar Engineering of Thermal Processes, second edition: J. A. Duffie, W. A. Beckman, John Wiley & Sons, Inc., New York (1991). ISBN 0-471-51056-4 +919 pp. Solar Energy. 1993;51(6):521-.

279. Schiavon S, Melikov AK, Sekhar C. Energy analysis of the personalized ventilation system in hot and humid climates. *Energy and Buildings*.42(5):699-707.
280. Schoen TJN. Building-integrated PV installations in The Netherlands: Examples and operational experiences. *Solar Energy*. 2001;70(6):467-77.
281. Scholz R; Scholz F; Scholz R, assignee. Building with insulating walls patent WO200161118-A; EP1255898-A; WO200161118-A1; DE10006878-A1; EP1255898-A1; US2003046894-A1; JP2003529000-W. 2001.
282. Schwarz M. New developments of room conditioning systems. *Management of Indoor Hygiene*. 2001;1603:103-19.
283. Serra R. *Clima lugar y arquitectura. Manual de diseño bioclimático*. Madrid (Spain): Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas (CIEMAT); 1989.
284. Sharples S. FULL-SCALE MEASUREMENTS OF CONVECTIVE ENERGY-LOSSES FROM EXTERIOR BUILDING SURFACES. *Building and Environment*. 1984;19(1):31-9.
285. Shaviv E. Computer aided energy conscious building design. *Renewable Energy*. 1998;15(1-4):343-8.
286. Shin CB, Economou DJ. MASS-TRANSFER BY NATURAL AND FORCED-CONVECTION IN OPEN CAVITIES. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1990;33(10):2191-205.
287. Skoplaki E, Boudouvis AG, Palyvos JA. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008;92(11):1393-402.
288. Soria M, Trias FX, Perez-Segarra CD, Oliva A. Direct numerical simulation of a three-dimensional natural-convection flow in a differentially heated cavity of aspect ratio 4. *Numerical Heat Transfer Part a-Applications*. 2004;45(7):649-73.
289. Stavrakakis GM, Koukou MK, Vrachopoulos MG, Markatos NC. Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical

- simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings*. 2008;40(9):1666-81.
290. Stec W, van Paassen D. Sensitivity of the double skin facade on the outdoor conditions. *Indoor Air 2005: Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vols 1-5*. 2005:1371-6.
291. Strachan PA, Vandaele L. Case studies of outdoor testing and analysis of building components. *Building and Environment*. 2008;43(2):129-42.
292. Tai CH, Zhao Y, Liew KM. Parallel computation of unsteady incompressible viscous flows around moving rigid bodies using an immersed object method with overlapping grids. *Journal of Computational Physics*. 2005;207(1):151-72.
293. Tanaka H, Okumiya M, Tanaka H, Yoon GY, Watanabe K. Thermal characteristics of a double-glazed external wall system with roll screen in cooling season. *Building and Environment*. 2009;44(7):1509-16.
294. Tapper, Boer D, Lichtenberg; Building facade formed by cavity wall, has inner skin formed by synthetic film for providing shade patent NL1029179-C6. 2007.
295. Thirumalai AV; Thirumalai a V, assignee. Solar energy refrigeration device patent IN9500018-I4.
296. Thompson JF. GRID GENERATION TECHNIQUES IN COMPUTATIONAL FLUID-DYNAMICS. *Aiaa Journal*. 1984;22(11):1505-23.
297. Thomsen KE, Schultz JM, Poel B. Measured performance of 12 demonstration projects - IEA Task 13 "advanced solar low energy buildings". *Energy and Buildings*. 2005;37(2):111-9.
298. Tombazis AN, Preuss SA. Design of passive solar buildings in urban areas. *Solar Energy*. 2001;70(3):311-8.
299. Torío H, Angelotti A, Schmidt D. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view. *Energy and Buildings*. 2009;41(3):248-71.

300. Torres M, Alavedra P, Guzman A, et al. Double Skin Facades - Cavity and exterior openings dimensions for saving energy on Mediterranean climate. Building Simulation 2007, Vols 1-3, Proceedings. 2007:198-205.
301. Tsuji T, Nagano Y. CHARACTERISTICS OF A TURBULENT NATURAL-CONVECTION BOUNDARY-LAYER ALONG A VERTICAL FLAT-PLATE. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1988;31(8):1723-34.
302. Ulgen K. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. Energy and Buildings. 2002;34(3):273-8.
303. UNE. UNE 92115:1997 .Materiales aislantes térmicos utilizados en la edificación. Productos de poliestireno extruido (XPS). 1997.
304. Vafai K, Etefagh J. THERMAL AND FLUID-FLOW INSTABILITIES IN BUOYANCY-DRIVEN FLOWS IN OPEN-ENDED CAVITIES. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1990;33(10):2329-44.
305. van Paassen AHC. Integration of intelligent facades and HVAC in low energy buildings. Ishvac 99: 3rd International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Vols 1 and 2. 1999:1-11.
306. van Schijndel AWM, Schols SFC. Modeling pressure equalization in cavities. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1998;74-6:641-9.
307. Voss K. Solar energy in building renovation - results and experience of international demonstration buildings. Energy and Buildings. 2000;32(3):291-302.
308. Wa-Gichia M. The high-rise opposing facade in clear sky conditions - Not always an "obstruction" to daylight. Solar Energy. 1998;64(4-6):179-88.
309. Wakitani S. Flow patterns of natural convection in an air-filled vertical cavity. Physics of Fluids. 1998;10(8):1924-8.
310. Wang L, Li NP. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in respect of exergy utilization. Energy and Buildings.42(2):221-9.

311. Wang S, Chen Y. A simple procedure for calculating thermal response factors and conduction transfer functions of multilayer walls. *Applied Thermal Engineering*. 2002;22(3):333-8.
312. Wang X, Kendrick C, Ogden R, Maxted J. Dynamic thermal simulation of a retail shed with solar reflective coatings. *Applied Thermal Engineering*. 2008;28(8-9):1066-73.
313. Weier H. The influence of naturally ventilated double facades on solar radiation heat load. *Bauphysik*. 2007;29(6):418-29.
314. Weilmuenster KJ, Greene FA. HL-20 COMPUTATIONAL FLUID-DYNAMICS ANALYSIS. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1993;30(5):558-66.
315. Wesseling P, Oosterlee CW. Geometric multigrid with applications to computational fluid dynamics. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2001;128(1-2):311-34.
316. Weyand N, Heinrich H, Dahlem KH. Energetic renovation of an residential building - measurement and measuring results of an "3 liter building" during 3 heating periods. *Bauphysik*. 2007;29(3):213-20.
317. Wolff T. Community coalition building - Contemporary practice and research: Introduction. *American Journal of Community Psychology*. 2001;29(2):165-72.
318. Wolff T. Community coalition building - Contemporary practice and research: Introduction. *American Journal of Community Psychology*. 2001;29(2):165-72.
319. Wong PC, Prasad D, Behnia M. A new type of double-skin facade configuration for the hot and humid climate. *Energy and Buildings*. 2008;40(10):1941-5.
320. Wright JL, Jin H, Hollands KGT, Naylor D. Flow visualization of natural convection in a tall, air-filled vertical cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006;49(5-6):889-904.

321. Wright JL, Jin H, Hollands KGT, Naylor D. Flow visualization of natural convection in a tall, air-filled vertical cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006;49(5-6):889-904.
322. Wu W, Ewing D, Ching CY. The effect of the top and bottom wall temperatures on the laminar natural convection in an air-filled square cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006;49(11-12):1999-2008.
323. Wu WJ, Ching CY. The effect of the top wall temperature on the laminar natural convection in rectangular cavities with different aspect ratios. *Proceedings of the Asme/Jsme Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference 2007, Vol 1*. 2007:1005-12.
324. Xaman J, Alvarez G, Lira L, Estrada C. Numerical study of heat transfer by laminar and turbulent natural convection in tall cavities of facade elements. *Energy and Buildings*. 2005;37(7):787-94.
325. Xu L, Ojima T. Field experiments on natural energy utilization in a residential house with a double skin facade system. *Building and Environment*. 2007;42(5):2014-23.
326. Xu XL, Yang Z. Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind. *Energy and Buildings*. 2008;40(8):1498-504.
327. Yakubu GS. The reality of living in passive solar homes: A user-experience study. *Renewable Energy*. 1996;8(1-4):177-81.
328. Yamada M, Uematsu Y, Sasaki R. A visual technique for the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings by using infrared thermography. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1996;65(1-3):261-71.
329. Yan DC, Tao JJ. An experimental research on the instability of natural convection boundary layer around a vertical heated flat plate. *Acta Mechanica Sinica*. 1999;15(1):1-7.
330. Yan WM. TRANSPORT PHENOMENA OF DEVELOPING LAMINAR MIXED CONVECTION HEAT AND MASS-TRANSFER IN INCLINED

- RECTANGULAR DUCTS. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1995;38(15):2905-14.
331. Yao LS. FREE AND FORCED-CONVECTION IN THE ENTRY REGION OF A HEATED VERTICAL CHANNEL. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1983;26(1):65-72.
332. Yu H, Liao CM, Liang HM. Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: isothermal condition. *Building and Environment*. 2003;38(11):1271-9.
333. Yu TY, Soni BK. APPLICATION OF NURBS IN NUMERICAL GRID GENERATION. *Computer-Aided Design*. 1995;27(2):147-57.
334. Yun GY, McEvoy M, Steemers K. Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic facade. *Solar Energy*. 2007;81(3):383-94.
335. Yun GY, Steemers K. Implications of urban settings for the design of photovoltaic and conventional facades. *Solar Energy*. 2009;83(1):69-80.
336. Zarzalejo LF, Polo J, Martín L, Ramírez L, Espinar B. A new statistical approach for deriving global solar radiation from satellite images. *Solar Energy*. 2009;83(4):480-4.
337. Zhang G; Zhang G, assignee. Energy storage fast cooler for cooling wagon box in running of motor car, has air storage tank whose bottom part is connected to drain pipe of drain device, and refrigeration device whose evaporator is arranged in storage tank by gasket patent CN101672505-A.
338. Zhong HZ, Bi HQ, Feng Y, Lei B. APPLICABILITY OF A DOUBLE-SKIN FACADE IN HIGH-RISE BUILDINGS DURING THE INTERMEDIATE SEASON. *Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings and Third International Conference on Built Environment and Public Health, Vol I and II, Proceedings*. 2009:1323-30.
339. Zhou J, Chen YM. A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 14(4):1321-8.

ANEXOS

AI.- TÉCNICAS NUMÉRICAS.

Los métodos numéricos o técnicas de cálculo usadas en Mecánica de Fluidos resultan una herramienta muy útil para el diseño y análisis de las fachadas ventiladas de juntas abiertas que utilizan el flujo de aire del canal para su funcionamiento. Aunque la mayor parte de las investigaciones en este campo se hacen para flujos estacionarios, en la actualidad existe un mayor interés por el cálculo de flujos no estacionarios que, por otro lado, son los más habituales en la práctica.

AI.1.- RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Existe una multitud de publicaciones relacionadas con los métodos numéricos. Entre ellas, destacan el libro escrito por Peyret et al. (1983), los de Hirsch (1988), los de Fletcher (1988), el de Hoffman (1989) y, más recientemente, el editado por Gunzburger (1993), que se centra en métodos apropiados para estudio de flujos incompresibles, el de Anderson (1995) y el de Versteeg et al. (1995), sobre el método de volúmenes finitos. Cada uno de los mencionados presenta sus propias peculiaridades, pero entre todos completan una panorámica bastante amplia de un campo continuamente cambiante.

AI.2.- MÉTODOS NUMÉRICOS EN MECÁNICA DE FLUIDOS.

La dinámica de fluidos computacional o CFD (acrónimo de las palabras inglesas Computational Fluid Dynamics) es la disciplina que utiliza los ordenadores para la simulación del movimiento de los fluidos, de la transferencia de calor, de las reacciones químicas o del arrastre de sólidos sumergidos.

Hasta finales de los años 60 los ordenadores no alcanzaron velocidades de cálculo suficientes para resolver casos sencillos. Anteriormente, la experimentación

constituía la única herramienta de análisis y diseño de cualquier problema de Mecánica de Fluidos.

En la actualidad, los ensayos experimentales siguen siendo necesarios para la comprobación de las prestaciones de diseños complejos, pero los continuos avances en los ordenadores y en los algoritmos permiten una reducción importante en el número de ensayos necesarios. Así, por ejemplo, el diseño típico de un modelo de ala de avión, exige en la actualidad 3 ó 4 ensayos en túnel aerodinámico, en lugar de los 10 ó 15 que eran necesarios anteriormente. En realidad, la palabra que mejor definiría hoy la relación entre ambas herramientas podría ser la de complementariedad (Strazisar, 1994 o Lakshminarayana, 1991).

A lo largo de los últimos quince años, las técnicas de CFD han evolucionado, mejorando los programas comerciales e introduciéndose en las distintas áreas de la ingeniería hasta hacerse un hueco dentro de las necesidades reales de la industria y en la construcción. Dichos programas se vienen usando de manera creciente paralelamente a la mejora de los sistemas informáticos que les sirven de soporte.

Desde su inicial concepción, orientada a la industria aeroespacial, la técnicas numéricas se han extendido a un número creciente de aplicaciones dentro de un amplio espectro de industrias, desde las más clásicas como la automovilística o electrónica, hasta las nuevas aplicaciones en industrias alimentarias y biomédicas. Sin embargo, aún no se emplean las técnicas numéricas como auténticas herramientas de diseño. Cuando se llegue a este nivel de utilización en el día a día del diseño cuando se obtendrán los mayores beneficios, es decir, cuando su difusión sea tal que puedan llegar a ser utilizadas por ingenieros y arquitectos sin demasiada especialización en estas técnicas y no estar restringida su utilización a los expertos en la materia.

El acrónimo CFD se asocia tradicionalmente a la simulación de flujos en aerodinámica, tales como aplicaciones en alas de avión o motores de propulsión (jet engines). Desde luego, es innegable que la industria aeroespacial fue pionera en el trabajo con CFD y que todavía hoy se encuentra entre las vanguardias en la explotación de estas técnicas, pero cada día más se empieza a hablar de aplicaciones en “procesos industriales”, donde los flujos son a baja velocidad y muchas veces prácticamente incompresibles. Esta denominación de proceso industrial se usa a menudo en la bibliografía técnica (Hirsch, 1995) para distinguir dichas aplicaciones de las aeronáuticas o de flujos a altas velocidades, con grandes efectos de compresibilidad presentes. Entre las aplicaciones más importantes en que se emplean las técnicas numéricas, se tienen:

a) Industria automovilística. Las aplicaciones típicas son el estudio de la aerodinámica de vehículos, la climatización del habitáculo interior, el enfriamiento del bloque motor, el flujo en válvulas de distribución, el diseño de filtros y elementos de control y las investigaciones sobre la descarga de combustible en depósitos.

b) Industria electrónica. Los problemas más estudiados son el flujo y la distribución de temperaturas en las carcasas electrónicas, el enfriamiento de distintos componentes, el flujo de aire en las unidades de discos, los procesos de construcción de chips usando la técnica de deposición química del vapor (CVD) y algunos problemas indirectos, como la ergonomía de grandes salas.

c) Industrias de proceso y químicas. Problemas habituales resueltos con técnicas CFD son el flujo de plásticos, los estudios en conducción de lodos, el flujo de cristal fundido, los flujos de tintes, la deposición de vapores químicos, el llenado de moldes, estudios en procesos de combustión y los flujos reactivos complejos (con intercambio de calor, masa y reacciones químicas).

d) Industria de conformados metálicos. Las aplicaciones más comunes en esta industria son los procesos de fundición continua, las fundiciones abiertas, la extrusión de metales y los procesos de solidificación (construcción de hélices de barco, por ejemplo).

e) Industria nuclear. Algunos estudios relacionados con el flujo en conductos de sustancias originadas en los procesos de reacción nuclear, el enfriamiento del reactor, estudios relacionados con el intercambiador de calor, el flujo en el interior del reactor, el almacenamiento de residuos nucleares, el diseño de torres de enfriamiento y las investigaciones sobre chorros térmicos.

f) Industria de recubrimientos de película fina. Entre otros, los problemas estudiados por medio de técnicas CFD han sido el recubrimiento de cintas magnéticas, el recubrimiento de películas de fotografía o de sonido, el recubrimiento de adhesivos, multitud de aplicaciones en la industria papelera y los recubrimientos de fibra óptica.

g) Industria biomédica y farmacéutica. Entre otras aplicaciones, destacan el flujo de la sangre en las venas y arterias, el flujo a través de distintas prótesis, el flujo en el interior del corazón, los distintos estudios en fenómenos de centrifugación y el diseño de sistemas de inyección intravenosa.

h) Industria alimentaria. Destacan los diseños de procesos de pasteurización, los estudios en equipos de procesamiento de alimentos con estructura toroidal, la extrusión de fluidos y los hornos de convección.

i) Industria aeroespacial. Las aplicaciones habitualmente estudiadas son los efectos de la microgravedad, la ventilación de habitáculos, el diseño de vehículos espaciales, los flujos de combustible en conductos y tanques, estudios varios en motores de propulsión.

j) Industria aeronáutica y naval. Estudios en perfiles aerodinámicos, diseño de trenes de aterrizaje, estudios en hélices marinas y el diseño de carenas de barcos.

j) Otras aplicaciones. Destacan los estudios en oceanografía, predicciones en hidrología (planificación de embalses, regímenes de precipitaciones, entre otros), los flujos en conductos (calefacción, flujos internos en edificaciones, ingeniería de complejos urbanos), los flujos medioambientales, la meteorología, los estudios de flujos alrededor de edificios, puentes y otras estructuras exteriores, las investigaciones relacionadas con la propagación de humos, los estudios sobre el enfriamiento y crecimiento del vidrio, el flujo en máquinas de desplazamiento positivo, las investigaciones en flujos con varias fases (sprays) y las aplicaciones en turbomáquinas (dada su relación con este trabajo, son analizados con más detalle en el capítulo cuatro del texto).

La panorámica es realmente amplia y susceptible de crecimiento en el futuro.

Las ventajas que proporciona el análisis por CFD se pueden resumir en las siguientes:

- Reducción sustancial de tiempos y de costes en los nuevos diseños.
- Posibilidad de analizar sistemas y condiciones muy difíciles de simular experimentalmente: velocidades supersónicas, temperaturas extremas y elementos en movimiento relativo, entre otros.
- Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límite de funcionamiento, por ejemplo accidentes.
- Nivel de detalle prácticamente ilimitado. Los métodos experimentales son tanto más caros cuanto mayor es el número de puntos de medida, mientras

que los programas CFD pueden generar un gran volumen de resultados sin coste añadido, y con posibilidad hacer estudios paramétricos.

- Proporcionan bastante información complementaria del comportamiento detallado, muy difícil de conocer experimentalmente.
- Un valor añadido es poder poner en el producto la etiqueta de “Diseñado con ayuda del ordenador”, y la facilidad para generar dibujos espectaculares, que estimulan la “compra” del producto (lo cual constituye un riesgo).

Las técnicas CFD no son baratas. En primer lugar, son necesarias máquinas de gran capacidad de cálculo (los investigadores trabajando con CFD son usuarios habituales de los ordenadores más potentes que existen), y un software con precio todavía no accesible al gran público. En segundo lugar, se necesita personal cualificado que sea capaz de hacer funcionar los programas y analizar adecuadamente los resultados.

Los desarrollos en el campo de las técnicas numéricas dedicadas al estudio de flujos se están acercando cada vez más a los de otras herramientas de CAE como las de análisis de esfuerzos en sólidos y estructuras. Su retraso se debe a la gran complejidad de las ecuaciones y, sobre todo, a la dificultad de modelizar adecuadamente la turbulencia.

Uno de los mayores inconvenientes de los métodos de CFD consiste en que no siempre es posible llegar a obtener resultados suficientemente precisos y siempre está presente la posibilidad de cometer graves errores en cuestiones básicas. Esto proviene de:

- Simplificación del fenómeno a estudiar para que el hardware y software sean capaz de tratarlo. El resultado será tanto más preciso cuanto más adecuadas hayan sido las hipótesis y las simplificaciones realizadas.

- La existencia de pocos modelos para la simular el efecto de la turbulencia, los flujos bifásicos o la combustión, entre otros.
- La tendencia humana de creerse todo lo que se ha obtenido de un modo un poco misterioso (léase ordenador), sobre todo cuando se nos presentan los resultados en forma atractiva.

AI.3.- NIVELES DE APROXIMACIÓN EMPLEADOS EN LAS TÉCNICAS NUMÉRICAS.

El desarrollo de las técnicas numéricas y su aplicación a cualquier ciencia o tecnología han dado lugar al desarrollo y a la concienciación generalizada de uno de los conceptos básicos en ingeniería como es el de grado de aproximación. Esta idea es bastante clara si se considera que lo que se pretende con cualquier técnica numérica es conocer las variables físicas a partir de la resolución numérica de una serie de ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

Habría que definir y establecer cuáles son las distintas aproximaciones que introducen los métodos numéricos. En lo referente a la Mecánica de Fluidos, la primera aproximación que aparece es el planteamiento del modelo matemático que defina el comportamiento físico real de un determinado flujo. Dicho modelo matemático está habitualmente basado en la hipótesis del continuo, válida para la mayor parte de problemas industriales, pero que tiene sus limitaciones para casos extremos de flujos de gases. Una vez hecha esta salvedad, aplicando las leyes básicas de la física clásica se puede establecer una serie de ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento matemático de toda partícula fluida.

La resolución exacta de dichas ecuaciones serviría para determinar completamente cualquier movimiento en el seno de un fluido. Se puede decir que un modelo matemático se define únicamente tras haber considerado el nivel de aproximación a la realidad requerido a la hora de obtener la exactitud deseada en

el cálculo de una serie de variables dependientes. Desafortunadamente, debido a la complejidad de las ecuaciones diferenciales (ecuaciones de gobierno) y a la complejidad geométrica de los equipos industriales que implican a los fluidos, no es posible obtener expresiones analíticas que sean solución exacta de las ecuaciones de gobierno.

Establecidas las ecuaciones de gobierno resulta imprescindible introducir una segunda aproximación al problema. La forma clásica de abordarlo sería construir un modelo a escala reducida del flujo en cuestión y analizarlo experimentalmente en el laboratorio. La aproximación numérica implica introducir algunas hipótesis simplificadoras que aproximen lo más posible los resultados finales a los que se obtendrían si se pudiera calcular la solución exacta. Dichas hipótesis se dirigen habitualmente hacia la simplificación tanto de la geometría a estudiar como de las ecuaciones a resolver. Obviamente, al no disponerse de la solución analítica exacta resulta bastante complicado establecer de antemano qué hipótesis sirven y cuales son descartables y, por tanto, en cualquier simulación aplicada a la Mecánica de Fluidos, es preciso dedicar mucho esfuerzo al análisis de los resultados obtenidos antes de aceptarlos como válidos.

Una vez definidas las ecuaciones diferenciales simplificadas, aparece otro problema relacionado con el posible tratamiento que se pueda hacer de dichas ecuaciones usando técnicas computacionales. Por medio de los ordenadores resulta muy fácil resolver una ecuación o sistema de ecuaciones algebraico, sin embargo, las ecuaciones que estudian el movimiento de los fluidos son ecuaciones diferenciales no lineales. Resulta obligatorio realizar la transformación de las ecuaciones de forma que puedan ser resueltas por un ordenador. El paso de las ecuaciones diferenciales a sus equivalentes lineales constituye otro nivel de aproximación y normalmente recibe el nombre de discretización de las ecuaciones.

En cuanto a la geometría a estudiar, se debe señalar que la aproximación a la que debe someterse no sólo es de orden descriptivo respecto a su contorno sino que además ha de establecerse la definición del espacio ocupado por el fluido. En este sentido, resulta imprescindible referir los puntos a un determinado sistema de coordenadas en los que se pretenderá resolver las ecuaciones para obtener soluciones de las variables deseadas. Aunque el campo fluido sea un continuo, no se puede pretender resolver las ecuaciones en todos los puntos de un determinado volumen, porque entonces se tendría un número infinito de ecuaciones a resolver. Por tanto, hay que elegir cierto conjunto de puntos en los que se resolverán las mencionadas ecuaciones y que serán los puntos dónde finalmente se conocerán los valores de las variables fluidas. La definición de estos puntos es lo que se denomina habitualmente discretización espacial del dominio (también se habla de generación del mallado). El proceso descrito no deja de ser otra aproximación que se introduce en el cálculo y que define el nivel de aproximación espacial.

En el caso de tener ecuaciones que dependan de la variable tiempo (flujo no estacionario) es esencial la definición de un nivel de aproximación temporal. No es posible tampoco estudiar la evolución de las variables en el tiempo de forma continua. El nivel indicará la forma de modelizar la evolución real introduciendo lo que se denomina discretización temporal del sistema de ecuaciones. A partir de la solución calculada se podrá realizar un promediado temporal oportuno para estudiar ciertas características medias del flujo que dependan de la evolución de las variables con el tiempo.

Finalmente, se pueden manipular las ecuaciones eliminando ciertos términos cuya influencia en un determinado problema se considere despreciable. La conclusión de que algún término no afecta a la solución de un determinado flujo se debe alcanzar tras analizar detenidamente la sensibilidad del problema ante valores dispares de dicho término.

Normalmente dicho estudio se hace tras adimensionalizar convenientemente las ecuaciones y realizar el correspondiente análisis de semejanza (técnicas

asintóticas). Esta cuestión es de importancia capital en la Mecánica de Fluidos y está en el origen de cualquier estudio experimental. Desde el punto de vista numérico, la eliminación de algún término en las ecuaciones introduce lo que se denomina nivel de aproximación dinámico de las ecuaciones consideradas.

Resumiendo, desde el modelo matemático (ecuaciones diferenciales no lineales) que aproxima la realidad física en un medio continuo se llega a un número finito de ecuaciones algebraicas que eliminan algún término de las ecuaciones de partida y que aproximan la evolución temporal real que, tras resolver con técnicas apropiadas, proporcionan una aproximación al valor de las variables incógnita en los puntos elegidos como discretización espacial del dominio de cálculo. En definitiva, se establece un nivel de aproximación numérico límite por debajo del cuál será imposible acercarse al valor real de las variables en los puntos elegidos. Sin embargo, desde un punto de vista ingenieril, el proceso descrito es perfectamente válido y ha significado a lo largo de la evolución de las técnicas numéricas, la posibilidad de mejorar diseños y ahorrar mucho esfuerzo que de otra manera supondría trabas insalvables a la evolución de muchos sectores industriales.

AI.4.- ECUACIONES DE GOBIERNO, CONDICIONES DE CONTORNO Y CONDICIONES INICIALES.

Las leyes que rigen el movimiento de una partícula fluida son conocidas desde mediados del siglo XIX. Son las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes, que pueden escribirse con distintas nomenclaturas, en distintos sistemas de referencia y con distintas notaciones (ver Aris, 1962; Batchelor, 1967; White, 1979 o Hirsch, 1988; por ejemplo). Para un fluido Newtoniano, se pueden escribir así (Hirsch, 1988):

Continuidad:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} + \mathbf{r}\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (\text{Al.1})$$

Cantidad de movimiento:

$$\mathbf{r} \frac{d\bar{\mathbf{u}}}{dt} = \mathbf{r} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{r}(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla)\bar{\mathbf{u}} = -\nabla P + \mathbf{m} \left[\nabla^2 \bar{\mathbf{u}} + \frac{1}{3}(\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \right] + \mathbf{r}\bar{\mathbf{f}}_e \quad (\text{Al.2})$$

Energía:

$$\frac{\partial(\mathbf{r}E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{r}\bar{\mathbf{u}}E) = \nabla \cdot (k\nabla T) + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{s}} \cdot \bar{\mathbf{u}}) + W_f + q_H \quad (\text{Al.3})$$

Todas están construidas partiendo de la observación de que cualquier evolución física de un sistema está gobernada por leyes de conservación. El concepto de conservación significa que la variación de una determinada magnitud intensiva o propiedad en un determinado volumen es debida al efecto neto de las fuentes internas de esa magnitud y al efecto del flujo de esa magnitud que cruza la frontera del volumen que define al sistema. En el caso de la Mecánica de Fluidos, las propiedades que se conservan son la masa, la cantidad de movimiento y la energía.

Habitualmente, en las técnicas numéricas no se intenta resolver estas ecuaciones directamente sino que se adimensionalizan de forma que por un lado resulte más cómodo manejar las ecuaciones sin preocuparse de las unidades y, por otro, se pueda llegar a despreciar términos por su valor muy inferior al resto de términos de la ecuación. Tal y como se ha señalado, eliminar ciertos términos resulta necesario en casi todos los problemas de Mecánica de Fluidos.

Ya sea en su forma dimensional o adimensionalizadas, se trata de un sistema de cinco ecuaciones diferenciales de segundo orden no lineales y no estacionarias. Las incógnitas o variables dependientes son la velocidad (3 componentes), la presión, la temperatura, la densidad y la viscosidad. Para su correcta solución se deberá disponer de dos ecuaciones adicionales que relacionen la densidad y la viscosidad del fluido con la temperatura y la presión (ecuaciones de estado). La solución analítica de estas ecuaciones con las correspondientes condiciones de contorno y condiciones iniciales definiría el campo fluido en una geometría cualquiera. Sin embargo, como se ha dicho, es imposible encontrar una solución analítica exacta de estas ecuaciones.

Condiciones de contorno y condiciones iniciales.

De tanta importancia como las ecuaciones de gobierno resultan las condiciones de contorno y condiciones iniciales. En la mayoría de los textos dedicados a las técnicas numéricas se concede gran importancia a las discusiones sobre las distintas posibles condiciones de contorno e iniciales.

Las condiciones iniciales definen el estado del fluido en el instante inicial considerado como origen para la evolución temporal ($t = 0$). Por tanto, para la correcta definición de un problema se deberá conocer el valor que tienen todas las variables en ese instante. Muchas veces, en problemas resueltos mediante técnicas numéricas esto es imposible, con lo que se ha de buscar una alternativa. La más sencilla y habitual consiste en dar a todas las variables un valor cero. Asumiendo que si se avanza suficientemente en el tiempo, se llega a un estado estacionario, o periódico, independientemente de la solución inicial, según las condiciones de contorno sean constantes o periódicas. Tiene una ventaja que radica en la sencillez de implementación, pero tiene una gran desventaja, pues dicha solución inicial se aparta bastante de la solución real con lo que puede dar lugar a problemas numéricos en cuanto a la resolución de las ecuaciones.

En función del tipo de evolución temporal, se clasifican las ecuaciones diferenciales y, por tanto los problemas de origen, en elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Una ecuación diferencial se clasifica dentro de un grupo u otro dependiendo de la forma de dependencia espacio-temporal de la evolución de las variables.

Las condiciones de contorno pueden ser de varios tipos. Los más comunes en la práctica son:

- a) Condiciones de contorno tipo Dirichlet. La variable dependiente es conocida en la frontera física del problema.
- b) Condiciones de contorno tipo Neumann. Se conoce en la frontera física del problema el valor del gradiente normal de la variable dependiente.
- c) Condiciones de contorno tipo Robin. La condición conocida constituye una combinación lineal de los tipos anteriores.
- d) Condiciones de contorno mixtas. En unas zonas de la frontera física se tienen condiciones de contorno Dirichlet y en otras zonas condiciones del tipo Neumann.

La correcta definición de las condiciones de contorno constituye una parte fundamental en la definición de un problema numérico (Shaw, 1992).

AI.5.- DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO: GENERACIÓN DE MALLADOS.

Las técnicas de generación de mallado numérico pueden ser definidas (Thomson et al., 1982; Thomson et al., 1983; Thomson, 1984 o Niederdrenk, 1987) como procedimientos para la distribución ordenada de observadores o estaciones de toma de datos en un dominio físico, de forma que exista la posibilidad de comunicación eficiente entre los distintos observadores y que los distintos

fenómenos físicos que ocurran en dicho dominio físico continuo estén representados con la suficiente exactitud por medio de dichos observadores (discretización espacial).

Los mallados se pueden clasificar atendiendo a dos criterios: la forma de definir las fronteras del dominio y la conectividad entre los distintos observadores o puntos del mallado.

En cuanto a la forma de definir las fronteras, están los mallados conformes (no interpolan en la definición de la frontera) y los no conformes (que no definen la frontera real sino una aproximación numérica de la misma).

Atendiendo al criterio de conectividad o estructura de los datos del mallado, existen dos métodos de generación de mallados que darían lugar a los dos tipos de mallados básicos: los estructurados y los no estructurados. En los mallados estructurados, los observadores se colocan siguiendo una red de familias de líneas coordenadas que permiten visualizar la relación entre unos y otros de forma directa. Este hecho simplifica mucho los algoritmos respecto a lo que sería un mallado de triángulos o tetraedros (según sea bidimensional o tridimensional), es decir, un mallado no estructurado.

En cualquiera de los casos (estructurado o no estructurado), el mallado debería cumplir una serie de requisitos genéricos:

- Ajuste a las fronteras de la región a estudiar de forma que las condiciones de contorno queden representadas con la mayor exactitud posible.
- El mallado debe distribuirse localmente de la forma más regular posible, con variaciones suaves de densidad. La densidad de un mallado se define como el número de puntos por unidad de superficie o volumen.
- La mayor densidad del mallado se debe localizar donde se espere que las variaciones espaciales de la solución sean mayores.

- El mallado debería ajustarse dinámicamente a las variaciones de las variables en la solución del flujo.

Los métodos de generación de mallados utilizados en la práctica se pueden agrupar en las siguientes categorías (Deconinck, 1994):

a) Mallados estructurados. Pueden ser curvilíneos generalizados u ortogonales. Los primeros son más fáciles de construir pero tienen el inconveniente de generar términos adicionales a la hora de resolver las ecuaciones de gobierno. Existen dos grandes grupos de técnicas de construcción de mallados curvilíneos generalizados, la interpolación algebraica y la resolución de ecuaciones diferenciales. En cuanto a los ortogonales, estos pueden ser conformes (resolución de ecuación diferencial elíptica) o generados resolviendo una ecuación diferencial hiperbólica (técnica de avance en el espacio, es decir, válida para flujos externos donde una frontera es libre). A priori, se desearía la ortogonalidad del mallado, no sólo por la simplicidad a la hora de resolver las ecuaciones sino porque cualquier desviación del mallado respecto a la ortogonalidad introduce errores de truncatura en cualquier modelo de solución de las ecuaciones de gobierno.

b) Mallados no estructurados. Existen dos técnicas básicas: el avance frontal y la triangularización de Delaney. La primera consiste en la construcción de triángulos o tetraedros partiendo de la definición de la frontera del dominio hasta completar el mismo. La triangularización de Delaney parte de una serie de puntos o nodos y los triángulos o tetraedros se construyen de forma que dichos puntos son los correspondientes centros de masas.

c) Técnicas de multibloque. Combinan mallados estructurados y no estructurados. Se crean bloques cuya estructura general sigue una disposición estructurada de mallados elementales que pueden tener una disposición interna en mallados estructurados o no estructurados. No se trata de otro tipo de mallado, sino una mezcla de los dos tipos básicos.

AI.6.- MODELOS MATEMÁTICOS.

Existen varias posibles simplificaciones en cuanto a la definición del modelo matemático, de gran interés por dar lugar a soluciones válidas en distintos problemas y que han sido ampliamente utilizadas en muchas aplicaciones numéricas. Se enumeran y describen brevemente los métodos más importantes. Normalmente cada una de estas estrategias ha sido desarrollada para un tipo particular de flujo.

Modelos de flujo potencial.

Describen el comportamiento de flujos irrotacionales de fluidos ideales, desarrollados en los albores de las técnicas numéricas. La teoría básica para el cálculo consiste en partir de la definición del concepto de potencial de velocidades. Constituye una simplificación adicional muy empleada para el cálculo de flujos estacionarios. Conceptualmente es de gran interés, pero está cayendo en desuso.

Ecuaciones para flujo ideal.

Cuando el número de Reynolds es suficientemente elevado, lo que ocurre en muchas de las aplicaciones prácticas de la Mecánica de Fluidos, despreciar los efectos viscosos y de conducción de las ecuaciones resulta una aproximación bastante cómoda pues elimina los términos difusivos de segundo orden en las ecuaciones diferenciales y hace que las ecuaciones de gobierno pasen a ser de primer orden, con todo lo que lleva asociado en cuanto a simplificación de cálculos.

Con las hipótesis de despreciar los efectos viscosos y la transferencia de calor por conducción, es decir, si se considera al fluido como ideal, se obtienen las ecuaciones de Euler. Los modelos numéricos que utilizan las ecuaciones de Euler eran hasta hace poco los únicos existentes. Hoy en día este tipo de modelos

constituye el punto de partida para el desarrollo de modelos más completos (un modelo aplicado al cálculo en turbomáquinas es desarrollado por Arts, 1989).

Las ecuaciones de Euler fueron desarrolladas por el famoso matemático suizo hacia el año 1670. Adoptan las expresiones:

Continuidad:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} + \mathbf{r}\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{Al.4})$$

Cantidad de movimiento:

$$\mathbf{r} \frac{d\vec{u}}{dt} = \mathbf{r} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \mathbf{r}(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\nabla P + \mathbf{r}\vec{f}_e \quad (\text{Al.5})$$

Modelo para flujo ideal, estacionario y rotacional.

Es un tipo de modelos muy similar a los del fluido ideal. Consiste en reducir el número de variables que intervienen en los cálculos introduciendo la vorticidad en las ecuaciones de cantidad de movimiento y de la energía. Normalmente se parte de la denominada representación de Clebsch para la velocidad en función de la vorticidad. No se consideran aquí ni las pérdidas por viscosidad en la capa límite ni los efectos de la turbulencia.

Solución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen una modelización correcta del flujo de un fluido continuo y Newtoniano, incluyendo todos los efectos viscosos y térmicos.

Adecuadamente resueltas incluyen los efectos de la turbulencia y de la capa límite. Pero esta resolución directa (ver Hirsch, 1988) requiere de una discretización espacial y temporal tan fina que está claramente fuera del alcance de cualquier aplicación industrial. Se ha estimado (Moin et al., 1997) en varios cientos de años de CPU del ordenador más potente existente en aquel año el cálculo de un segundo de vuelo de un avión comercial.

La resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes sí que es posible si se utilizan modelos adecuados para simular el efecto de la turbulencia y de la capa límite en discretizaciones no tan detalladas. Un poco más adelante se hablará de ellos.

Modelo parabólico de las ecuaciones de Navier-Stokes (PNS).

Este tipo de modelos ha sido desarrollado para el cálculo de flujos supersónicos e hipersónicos, donde la captura de las ondas de choque, gradientes de presión, esfuerzos viscosos superficiales y transferencia de calor son los objetivos más importantes para cualquier diseño.

Las ecuaciones de gobierno parabólicas se obtienen a partir de las de Navier-Stokes considerando las siguientes hipótesis:

- Flujo estacionario.
- Los gradientes de esfuerzos viscosos son despreciables en la dirección de las líneas de corriente.
- Los gradientes de presión en la dirección de las líneas de corriente se aproximan por su valor en zonas de capa límite cercanas.

Se ha investigado mucho en las ecuaciones parabólicas de Navier-Stokes (Parabolizad Navier-Stokes) y se han desarrollado muchos algoritmos en los

últimos años (Hirsch, 1988 y Hoffman, 1989), aunque su aplicación está muy limitada al sector aeroespacial.

Modelo de flujo incompresible

Un flujo se denomina incompresible cuando la densidad del fluido en cada instante permanece independiente de las variaciones de presión. La importancia de los flujos incompresibles es indudable y algunos autores, como Batchelor (1967), llegan a afirmar que los problemas relacionados con este tipo de flujos constituyen la aplicación más importante de la Mecánica de Fluidos.

Cuando el flujo es además isoterma, las ecuaciones de gobierno se simplifican notablemente y la solución para las distintas variables se hace independiente de la temperatura. El sistema de ecuaciones requerido queda reducido a la ecuación de continuidad y la de cantidad de movimiento, que expresadas adimensionalmente y con la única presencia de la gravedad como fuerza volumétrica, adoptan la forma:

Continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{A1.6})$$

Cantidad de movimiento:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla P + \frac{1}{R_e} \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{F_r} \vec{g} \quad (\text{A1.7})$$

Contrariamente a lo que pudiera pensarse, la hipótesis de incompresibilidad complica bastante la resolución de las ecuaciones. No sólo la densidad sino también los distintos coeficientes de transporte del fluido son independientes de la presión y de la temperatura. De esta forma, las ecuaciones de continuidad y de

cantidad de movimiento son independientes de la ecuación de la energía, que no es necesario resolver para obtener los campos de velocidades y presión. Pese a la ventaja que esto parece implicar, en la práctica, las dos ecuaciones a resolver se vuelven “rígidas” por la ausencia de derivada temporal en la ecuación de continuidad, y su solución resulta más dificultosa al no ser posible una iteración tomando ambas como punto de partida.

Turbulencia

El número de Reynolds de un flujo da una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia, asociadas con los efectos convectivos, y las fuerzas viscosas. En experimentos con fluidos se observa que para valores inferiores a un número de Reynolds denominado crítico, el flujo es intrínsecamente estable y las capas de fluido adyacentes se deslizan unas sobre otras de forma ordenada. El régimen del flujo se denomina laminar.

Si el flujo tiene un valor del número de Reynolds por encima del denominado crítico, se manifiestan en éste unas perturbaciones que dan lugar a un cambio radical del carácter del flujo. El movimiento se vuelve intrínsecamente no estacionario, incluso con condiciones de contorno constantes. Este régimen se denomina flujo turbulento.

La turbulencia se define como el estado de movimiento de un fluido en el que las distintas variables relevantes (presión, velocidad, etc.) fluctúan de una forma desordenada. Se trata de un estado no estacionario desde el punto de vista macroscópico en el que las distintas variables adoptan valores dependientes tanto de la posición como del tiempo y estos valores varían de una forma aleatoria y desordenada, es decir, caótica.

La descripción del movimiento de las partículas fluidas debido al efecto de la turbulencia resulta altamente compleja y constituye un problema aún sin solución desde el punto de vista de los métodos numéricos. Se han propuesto varias formas de resolver el problema utilizando distintas aproximaciones. A continuación se exponen los métodos conocidos como simulación directa, simulación de los grandes vórtices y promediado temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes.

- **Simulación directa de las ecuaciones (DS).**

Este método consiste, en realidad, en no utilizar ningún modelo para la turbulencia, sino realizar discretizaciones temporales y espaciales que sean capaces de simular el flujo en un determinado problema.

La resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes resulta hoy en día abordable sólo para un número muy limitado de problemas simples de interés académico. Los grandes centros dedicados a la Mecánica de Fluidos disponen de líneas de investigación con esta orientación, pero tanto las limitaciones en memoria de almacenamiento de las variables, como en el tiempo de cálculo hacen de momento impensable la solución generalizada de problemas prácticos usando este tipo de técnicas. Según Vandromme (1989), la primera solución de este tipo se realizó en 1981 en la Universidad de Stanford.

- **Simulación de grandes vórtices (LES).**

Este tipo de técnicas numéricas (Large Eddy Simulation) reducen la complejidad de las ecuaciones de gobierno considerando sólo parte de los efectos turbulentos del flujo. Se estudia el intercambio energético entre las denominadas “fluctuaciones de gran escala” y se simula el efecto de las pequeñas escalas de la turbulencia.

Se trata de un tipo de modelo intermedio entre la simulación directa y el promediado temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes, que extiende el promedio temporal a la captura de ciertos efectos turbulentos básicos de forma numérica. En los modelos de simulación de grandes vórtices, las ecuaciones no estacionarias del flujo se resuelven para el flujo principal y para los vórtices grandes mientras que se modela el efecto de los vórtices pequeños.

Aunque sin llegar al extremo de la simulación directa, sólo es posible para problemas simplificados y requiere unas capacidades de cálculo muy elevadas.

- **Modelos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS).**

Los modelos de promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes) han sido muy estudiados y resultan bastante útiles en la mayoría de los problemas prácticos resueltos mediante técnicas numéricas.

El procedimiento de promediar las leyes que describen el movimiento de una partícula se introduce en las ecuaciones con el fin de obtener los comportamientos promedio y turbulento (aleatorio) de las distintas variables. El punto de partida es muy sencillo. Se trata de obtener una descomposición de las variables en su valor medio y su valor fluctuante. Por ejemplo, para la velocidad, la descomposición sería:

$$\vec{u} = \bar{\vec{u}} + \vec{u}' \quad (\text{A1.8})$$

Donde:

$$\bar{\vec{u}}(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \vec{u}(t + \tau) d\tau \quad (\text{A1.9})$$

suponiéndose que el periodo de integración es lo suficientemente grande en comparación con la escala temporal de la turbulencia de forma que se elimine su efecto, pero lo suficientemente pequeño como para captar cualquier fenómeno no estacionario distinto a la turbulencia. El uso de este tipo de métodos es bastante grande, pues la mayoría de los fenómenos no estacionarios en Mecánica de Fluidos ocurre a frecuencias con rangos muy alejados del rango de frecuencias de la turbulencia.

El proceso de promediado temporal de las ecuaciones diferenciales, da lugar a unos términos (denominados de tensiones de Reynolds (Reynolds stresses), que involucran medias de los productos de las fluctuaciones de las componentes de la velocidad, cuya relación con las componentes medias del flujo es desconocida. Para obtener dicha relación es necesario introducir un modelo adicional, denominado habitualmente modelo de turbulencia. Las distintas posibilidades prácticas en cuanto a modelos de turbulencia son analizadas a continuación.

Modelos de turbulencia desarrollados y establecidos en aplicaciones prácticas.

Habitualmente lo que interesa son los efectos de la turbulencia sobre los valores medios de las variables: la velocidad media y la presión media en el caso del flujo en un conducto; en el caso de un avión, las fuerzas medias de resistencia y sustentación; para el caso de un motor, los efectos de la turbulencia sobre las relaciones de mezcla entre combustible y comburente.

Para conseguir esto, las ecuaciones de Navier-Stokes se promedian sobre las escalas de las fluctuaciones de turbulencia (RANS). Estos métodos dan lugar a un campo de flujo promediado y simulado que es más uniforme que el flujo real, y,

por tanto, reduce drásticamente el número de puntos de la discretización espacial y de la temporal necesario para obtener las variables buscadas.

Un modelo de turbulencia es un procedimiento numérico que permite relacionar los valores medios de las fluctuaciones de las variables con los valores promedio (en la nomenclatura propia de estos métodos, se habla de cerrar el sistema de ecuaciones), de forma que se puedan resolver las ecuaciones de gobierno. Un modelo de turbulencia será útil, dentro de un programa CFD de propósito general, si es exacto, sencillo y económico (computacionalmente hablando). Los modelos de turbulencia más comunes son los siguientes (Wilcox, 1993):

Modelos algebraicos:

- Modelo de cero ecuaciones: modelo de la longitud de mezcla.
- Modelo Cebeci-Smith-Mosinski.
- Modelo Baldwin-Lomax.

Modelos de viscosidad turbulenta:

- Modelo de una ecuación: modelo k.
- Modelo de dos ecuaciones: modelos k-e, k- ϵ , k- ω , modelo RNG.

Modelos de ecuaciones de las tensiones de Reynolds (RSM).

Cada uno de ellos tiene sus ventajas e inconvenientes. Aquí se expondrá brevemente el modelo k-e, por ser el que finalmente se utilizó en los cálculos numéricos (capítulo 5).

Modelos de dos ecuaciones: modelo k-e.

Como modelo de cierre o estrategia numérica para resolver de forma aproximada las ecuaciones de Navier-Stokes, se desarrollan dos ecuaciones de transporte adicionales (similares a las definidas en A1.1 y A1.2), una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la velocidad de disipación viscosa (e). Estas variables se definen según las expresiones:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (\text{A1.10})$$

$$\mathbf{e} = 2\nu \overline{e'_{ij}} + \overline{e'_{ij}} \quad (\text{A1.11})$$

donde e_{ij} es el tensor de velocidad de deformación.

Las ecuaciones de transporte para k y e se basan en el conocimiento de los procesos importantes que producen los cambios en esas variables y son (Versteeg et al., 1995):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{m}_k}{\mathbf{s}_k} \text{grad} k \right] + 2\mathbf{m}_k E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho e \quad (\text{A1.12})$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{m}_e}{\mathbf{s}_e} \text{grad} e \right] + C_{le} \frac{e}{k} 2\mathbf{m}_k E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2e} \frac{e}{k} \rho e \quad (\text{A1.13})$$

donde E_{ij} es el tensor de componentes medias de la velocidad de deformación. El significado físico de las anteriores expresiones se puede resumir en el siguiente balance:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad .de} \\ \text{cambio .de .k/e} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Transporte .de .k/e} \\ \text{por .convección} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Transporte .de .k/e} \\ \text{por .difusión} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{producción} \\ \text{de .k/e} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Destrucción} \\ \text{de .k/e} \end{array} \right]$$

Al igual que en la ecuación de transporte de k, los términos de transporte turbulento que aparecen en la ecuación exacta se representan utilizando el concepto de difusión del gradiente.

La escala de velocidad λ es característica de los remolinos y de las propiedades del flujo principal y se define siguiendo la expresión:

$$\lambda = cl \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (\text{AI.14})$$

donde c es una constante adimensional y l la escala de longitud turbulenta, que se define como:

$$l = \frac{k^{3/2}}{e} \quad (\text{AI.15})$$

Este método utiliza la velocidad de disipación ϵ de los remolinos pequeños para definir la escala de longitud l de los remolinos grandes porque, para altos números de Reynolds, la velocidad de extracción de energía del flujo de los remolinos grandes es igual a la velocidad de transferencia de energía a los remolinos pequeños. Si esto no fuese así, la energía en algunas escalas de la turbulencia podría aumentar o disminuir sin límite, cosa que no ocurre en la práctica con lo que se justifica el uso de la velocidad de disipación ϵ dentro de la definición de la escala de longitud l.

Aplicando la misma aproximación del modelo de la longitud de mezcla se puede obtener la viscosidad turbulenta como:

$$\mathbf{m}_t = r C_m \cdot l = r C_m \frac{k^2}{e} \quad (\text{AI.16})$$

Las ecuaciones de transporte de k y e contienen cinco constantes ajustables C_μ , los números de Prandtl (s_k y s_e), C_{1e} y C_{2e} , aunque se suelen emplear valores fijos para una amplia gama de flujos turbulentos. Los números de Prandtl (números adimensionales que muestran el peso relativo de los términos viscosos frente a los términos de transmisión de calor por conducción) relacionan las difusividades de k y e con la viscosidad turbulenta (μ_t).

Las principales ventajas e inconvenientes del modelo, tal y como pueden encontrarse en la bibliografía consultada (Lakshminarayana, 1991 y Versteeg et al., 1995), son las siguientes:

A) VENTAJAS:

- Sólo se necesita fijar las condiciones iniciales y de contorno.
- Resultados excelentes para una gran cantidad de flujos.
- Es el modelo turbulento más ampliamente utilizado en la mayoría de flujos en aplicaciones industriales.
- Se dispone de leyes de pared desarrolladas como condiciones de contorno para este tipo de modelos.

B) INCONVENIENTES:

- Implementación más compleja que los modelos algebraicos debido a la introducción de dos ecuaciones diferenciales extra.
- Pobres resultados en casos importantes, tales como: flujos no confinados, flujos con grandes gradientes longitudinales, flujos turbulentos completamente desarrollados en conductos no circulares.

Capa límite

La capa límite es la zona del campo fluido próxima a un contorno sólido en la que se manifiestan los efectos viscosos. Debido a la viscosidad y a la condición de no deslizamiento, cerca de cualquier contorno sólido aparece un gradiente de velocidades en la dirección normal a dicho contorno. Este gradiente de velocidades condiciona el intercambio energético entre las distintas partículas de fluido con velocidades diferentes, originando vorticidad y turbulencia.

El problema básico para la modelización numérica del intercambio energético en la capa límite próxima a cualquier frontera sólida consiste en definir correctamente las velocidades de las partículas en una zona muy estrecha cercana a dicha frontera. Esto origina un crecimiento muy grande del mallado requerido, cuya densidad debe ser lo suficientemente elevada como para capturar los distintos fenómenos que se producen dentro de la capa límite.

Esta dificultad se ha abordado usando varias aproximaciones, que se pueden englobaren tres grupos: modelos de distribución de las pérdidas, modelos de capa de cortadura y modelos de capa límite, que son brevemente explicados a continuación.

- **Modelos de distribución de las pérdidas (Distributed loss models).**

Este tipo de modelos constituye una aproximación muy usada en flujos internos (el fluido está confinado en un canal de paso limitado por paredes sólidas). La hipótesis básica consiste en suponer que el efecto de las tensiones cortantes debidas a la viscosidad es equivalente a una fuerza de rozamiento distribuida a lo largo del canal de paso y definida por valores semiempíricos conocidos del problema a resolver.

Aunque con este tipo de modelos se puede predecir el flujo en gran parte de la geometría, es claro que se pierde la definición en zonas cercanas a las superficies sólidas. A veces esta falta de precisión en la definición del flujo no es tolerable y se requiere superponer algún modelo de capa límite que complementa al modelo de distribución de las pérdidas.

Los modelos de distribución de pérdidas fueron muy populares en los albores de las técnicas CFD cuando la potencia de cálculo hacía difícil de llevar a la práctica cualquier otro tipo de modelo (Bosman, 1976).

- **Modelos de la capa de cortadura (TSL).**

En nomenclatura anglosajona, Thin Shear Layer (TSL). Son métodos apropiados para flujos a elevados números de Reynolds en los que las zonas de influencia viscosa, estelas o capas de cortadura ocupan una extensión muy reducida dentro de la geometría del problema estudiado. Fuera de estas zonas, resulta suficiente con considerar el modelo de fluido ideal.

Para este tipo de modelos se requiere una discretización espacial muy densa (de alta definición) en las zonas en las que se espera influencia de los términos viscosos. En realidad se trata de un cálculo ligeramente más avanzado

que el correspondiente al modelo de capa límite, porque en este caso la geometría de la capa límite es resultado del cálculo y no se introducen hipótesis adicionales.

Este tipo de modelos ha sido aplicado sobre todo a multitud de problemas relacionados con aplicaciones aerodinámicas (Hirsch, 1988).

- **Modelos de capa límite (Boundary layer approximations).**

Derivado de los estudios de Prandtl sobre la estructura del flujo para elevados valores del número de Reynolds. Bajo estas condiciones, el campo de velocidades en un fluido se puede separar en dos zonas, una de flujo no viscoso alejada de los contornos sólidos y otra dominada por los efectos de la viscosidad, denominada capa límite.

Las ecuaciones de este tipo de modelos se pueden derivar de las del modelo de la capa de cortadura simplificándolas aún más mediante la hipótesis del valor despreciable de la velocidad en la dirección normal a la superficie considerada en comparación con la velocidad en la dirección de las líneas de corriente.

También existen muchas aplicaciones prácticas de este tipo de modelos (Launder et al., 1972)

- **Leyes de pared.**

Una posibilidad distinta a los modelos mencionados consiste en incluir en los cálculos alguna aproximación la distribución de velocidades esperado. Con tal fin, se pueden utilizar las distribuciones de velocidad medidos experimentalmente, pero la práctica habitual consiste en utilizar los datos de distribuciones teóricas. En el contexto de los métodos numéricos, las funciones o “leyes de pared” son una

colección de fórmulas semi-empíricas que unen los valores de las distintas variables en las zonas próximas a los contornos sólidos y sobre dichos contornos. Normalmente incluyen tanto las relaciones para las variables medias y fórmulas para el tratamiento de la turbulencia en zonas próximas a los contornos sólidos.

La definición de las distintas fórmulas, con rangos de aplicabilidad variables, provienen de los estudios sobre capa límite y parten de la definición de las variables adimensionales características de dichos estudios. Suelen distinguirse dos zonas que dan lugar a la utilización de las denominadas leyes para capas internas y leyes para capas externas.

En la bibliografía existen multitud de modelos basados en alguna hipótesis sobre la distribución de velocidades dentro de la capa límite (Launder et al., 1972 o White, 1991).

AI.7.- MÉTODOS DE DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES.

A lo largo de la historia de los métodos numéricos aplicados a la Mecánica de Fluidos muchas han sido las aproximaciones o formas de pasar del modelo matemático al modelo numérico discreto. Las técnicas modernas se construyen con un requerimiento adicional importante consistente en la condición de que el resultado final de la discretización sea fácilmente integrable en una arquitectura de cálculo determinada. Se indican a continuación las técnicas más comunes que cumplen este requerimiento y que son usadas en las distintas aproximaciones en CFD.

AI.7.1- Consistencia, convergencia y estabilidad.

Se dice que el sistema de ecuaciones algebraicas generadas en el proceso de discretización es consistente con el sistema original si, cuando el espaciado del

mallado tiende a cero, el sistema de ecuaciones es equivalente al sistema en derivadas parciales en cada punto.

Se define la convergencia como la capacidad que tiene un conjunto de ecuaciones algebraicas para representar la solución analítica de un conjunto de ecuaciones diferenciales, si ésta existiese. Las ecuaciones se dice que convergen si la solución numérica tiende a la solución analítica cuando el espaciado del mallado o el tamaño del elemento tiende a cero.

Un conjunto de ecuaciones resulta estable si los valores de las variables implicadas tienden hacia una solución correcta sin que los errores de cálculo en la solución discreta deformen los resultados mientras se realiza el proceso numérico.

En la práctica se dice que un proceso numérico converge si los valores de las variables en los puntos del dominio tienden hacia unos valores fijos mientras la solución progresa. Esto es así porque en muchos casos no se puede demostrar matemáticamente la convergencia “estricta”. En el caso de un cálculo no estacionario en una turbomáquina, la convergencia no se entiende como la obtención de un valor fijo para las distintas variables dependientes sino como la obtención de una variación periódica de los valores de cada una de estas variables.

AI.7.2.- Métodos de discretización espacial empleados.

Existen tres métodos básicos en la discretización de las ecuaciones de gobierno: diferencias finitas, volúmenes finitos y residuos. A continuación se describen brevemente las tres posibilidades.

Método de las diferencias finitas.

Está basado en la resolución de una derivada mediante una aproximación por diferencias entre los puntos vecinos. Utilizando los desarrollos en series de Taylor se describen las derivadas como diferencias entre los valores de una variable en varios puntos del espacio o del tiempo. Mediante la aplicación de tales aproximaciones, el sistema original de ecuaciones diferenciales se reduce a un sistema de ecuaciones algebraicas ya sin derivadas, que es resuelto mediante técnicas convencionales.

La discretización en diferencias finitas está construida para una malla cartesiana. Su extensión a geometrías curvilíneas más complejas pasa por transformar las ecuaciones de gobierno por medio del correspondiente cambio de base a un sistema de coordenadas que siga la dirección de dichas geometrías curvilíneas. Una vez realizado el cambio de variable, el método de diferencias finitas es aplicable a resolución de problemas en dichas geometrías (Hoffman, 1988).

Método de los volúmenes finitos.

Constituye la técnica más comúnmente empleada en la discretización de las ecuaciones de Navier-Stokes. Se desarrolló para resolver específicamente problemas de transferencia de calor y de mecánica de fluidos (Patankar, 1980). Parte del hecho de que las leyes básicas de la mecánica de fluidos son leyes de conservación y pueden ser expresadas en forma de balances macroscópicos de las distintas variables.

En primer lugar se define una división del dominio en celdas que no se superpongan unas con otras. Normalmente se usan figuras geométricas sencillas

(polígonos en dos dimensiones y poliedros en tres dimensiones), que constituyen el mallado del dominio a estudiar.

A continuación se aplican los balances de los flujos de las distintas variables en los “volúmenes” contruidos a partir del mallado definido. En general éstos no tienen porque coincidir con las celdas del mallado, pudiendo ser conjuntos de celdas o encontrarse desplazados con respecto a dichas celdas.

Para cada uno de los “volúmenes” el balance de los flujos de una determinada variable proporciona información sobre el valor medio de dicha variable en el interior del mismo.

Desde un punto de vista práctico, el método consiste en ir sustituyendo las integrales de la ecuación general de conservación por sumatorias sobre las caras del volumen, que indicarán la forma de variación de dicha variable para cada “volumen” elemental, llegándose a la expresión:

$$\Delta(\text{Variable}) = \left(\sum_1^n (\text{flujos} + \text{términos fuente}) \right) \frac{\Delta t}{\text{Vol}} \quad (\text{Al.17})$$

donde Vol es la medida de cada “volumen”, n es el número de las caras del “volumen” y los términos de flujo se evalúan en la dirección normal de cada cara.

Los valores de las distintas variables en las caras (superficies o lados) de los distintos volúmenes no son conocidos y se requiere algún tipo de interpolación numérica para calcularlos. La elección de los “volúmenes”, así como la de las interpolaciones dan lugar a una gran variedad de métodos (ver Hirsch, 1988 o Degrez, 1994).

El método de los volúmenes finitos constituye el método más flexible, bajo el punto de vista geométrico, para la discretización de las ecuaciones de gobierno. Dado que será el método usado en la resolución numérica del flujo en una bomba centrífuga, se exponen a continuación los distintos pasos (Versteeg, 1995) que este tipo de métodos emplea en la discretización de las ecuaciones de gobierno para flujo incompresible no estacionario:

a) Discretización de los términos difusivos en la ecuación de la energía (velocidad del flujo nula). Cuando se presenta un problema en el que no existen términos convectivos, debidos a la velocidad del flujo, la resolución de las ecuaciones es inmediata. Este paso es previo en la utilización de este tipo de métodos.

b) Discretización de los problemas con términos convectivos y difusivos. El principal problema para la aplicación de este método consiste en la definición del valor de la variable considerada en la frontera del “volumen” de cálculo. Mientras que en el caso de los términos difusivos la influencia de las celdas próximas es idéntica, sin direcciones predominantes, los términos convectivos se ven afectados por el flujo (mayor peso de las celdas aguas arriba que el de las situadas aguas abajo). El tipo de interpolación usada condiciona la estabilidad y convergencia del método. Se utilizan métodos centrados, métodos que consideran el predominio de las posiciones aguas arriba y métodos de orden superior (QUICK).

c) En el caso de los flujos incompresibles, hay que añadir un algoritmo para resolver los campos de presión y velocidad. Este consiste en un proceso iterativo basado en la solución de los campos de presión y velocidad para un determinado instante, de forma que se asegure la verificación de la ecuación de continuidad. Normalmente se usan algoritmos del tipo SIMPLE (Patankar, 1980), MAC (Ikohagi, 1991) o PISO (recomendado para cálculos no estacionarios en mallados altamente distorsionados, Versteeg et al., 1995).

d) Cuando el flujo considerado varía con el tiempo, esta variable ha de discretizarse y la solución de las ecuaciones con una determinada precisión temporal condicionará la validez de la solución. Algunas técnicas utilizadas en la práctica se comentan en el apartado dedicado a las discretizaciones temporales.

Siguiendo los pasos descritos se llega a la definición de un sistema de ecuaciones lineales equivalente cuya resolución definirá los valores de las distintas variables consideradas.

Algunos ejemplos de aplicación de este tipo de técnicas pueden encontrarse en Jameson (1981), Walker (1990) o Rosenfeld (1991).

Método de los residuos.

Se basa en una representación funcional de la solución numérica. Hasta ahora, en los otros dos métodos vistos, se hacía una representación discreta de la solución (conjunto de puntos). Aquí, en cambio, la solución se escribe como combinación lineal de varias funciones continuas denominadas base (v_i), de forma que se cumplirá: $\bar{u} = \sum u_i v_i(x)$. Al tratarse de un proceso numérico, la solución no será exacta sino que dará lugar a un residuo, cuya minimización por medio de funciones peso caracterizará el método (métodos Galerkin, métodos de colocación o métodos Petrov-Galerkin). La definición de la base de funciones sobre la que se construye la solución da lugar a dos tipos básicos de métodos: los de elementos finitos y de los métodos espectrales, que son descritos a continuación.

- **Método de elementos finitos.**

Aplica a una representación funcional los conceptos del método de las diferencias finitas. Los parámetros de la representación son puntos que dividen el dominio en una serie de elementos. Las funciones base se definen como interpolaciones polinómicas restringidas a los elementos contiguos (normalmente triángulos o cuadriláteros). Las interpolaciones pueden resultar en aproximaciones lineales, cuadráticas o de orden superior. Normalmente, para las aplicaciones de Mecánica de Fluidos se recomienda que sean al menos cuadráticas para poder aproximar las derivadas segundas con cierta precisión.

Un ejemplo de aplicación del método de elementos finitos se muestra en Combes (1991).

- **Métodos espectrales.**

Se trata de métodos basados en la descomposición de una función en series de Fourier (combinación de funciones seno y coseno que, en realidad, se pueden considerar como una base ortogonal de funciones). En particular las funciones senoidales sólo son aplicables a problemas con condiciones de contorno periódicas y normalmente se usan funciones polinómicas del tipo de Chebyshev o Legendre.

Los métodos espectrales han demostrado su eficiencia en problemas unidimensionales, pero para problemas en dos o tres dimensiones su aplicación resulta muy complicada. Por otra parte, la gran precisión de los cálculos permite reducir mucho el número de puntos de la discretización y les hace apropiados en el tratamiento de fenómenos como la turbulencia. Así, estos métodos son los usados en los métodos de simulación directa de las ecuaciones de Navier-Stokes (Peyret et al., 1983).

Comparación entre las técnicas de discretización.

Algunos aspectos relacionados con los métodos numéricos que pueden aparecer de forma común en las tres técnicas son:

- Obtención de un sistema de ecuaciones algebraicas para los valores de las variables en un número finito de puntos del dominio.
- Las condiciones iniciales para comenzar el cálculo de la solución.
- Las condiciones de contorno del problema.
- La forma explícita o implícita de las ecuaciones.

Las diferencias básicas entre las tres técnicas son:

- Las diferencias finitas y los volúmenes finitos producen ecuaciones numéricas referidas a un punto pero dependientes de los valores de los puntos vecinos. Los elementos finitos producen ecuaciones para cada punto independientes entre sí, y solamente cuando se combinan los valores de los puntos interactúan entre ellos.
- Los elementos finitos toman la derivada de las condiciones de contorno cuando las ecuaciones se forman aplicando los valores fijos de las variables a las matrices globales. Los otros dos métodos aplican fácilmente los valores fijos de las condiciones de contorno modificando las ecuaciones si se quiere introducir alguna derivada de una condición de contorno.
- En el método de diferencias finitas se debe usar siempre un mallado regular y uniforme (gran inconveniente) aunque la cantidad de datos a almacenar relacionados con la conectividad del mallado es muy pequeña (gran ventaja). Estas dos características implican unos programas de resolución muy simples y rápidos.
- En el método de los residuos, los elementos pueden no estar uniformemente distribuidos pero se necesita almacenar más datos siendo

bueno para casos en los que intervengan geometrías complicadas, aunque tiene el inconveniente de que los programas son lentos y muy complejos. Una ventaja de estos métodos es que fueron orientados hacia las técnicas CFD y por lo tanto tiene una programación muy estructurada (mucha versatilidad).

- Para el caso de geometrías complejas, que además incluyan distintas partes con movimiento relativo unas respecto a otras, el método de volúmenes finitos es prácticamente la única posibilidad con valor práctico, debido a la gran dificultad para solucionar el flujo en geometrías alejadas de cualquier división cartesiana por parte de los métodos de diferencias finitas y dada la gran complejidad en la programación de los métodos de los residuos.

AI.8.- SOLUCIÓN SIMULTÁNEA DE LAS ECUACIONES.

En la mayor parte de los casos las ecuaciones discretas obtenidas de las ecuaciones diferenciales se encuentran en forma implícita ya que son más estables que los esquemas explícitos.

En general, la solución de un conjunto de ecuaciones simultáneas se puede entender como el proceso de encontrar un vector “x” que satisfaga la ecuación:

$$Ax = b \quad (\text{AI.18})$$

siendo “A” el operador del vector “x” y “b” un vector de valores conocidos. La solución de este sistema exige determinar la inversa de la matriz “A”:

$$x = A^{-1}b \quad (\text{AI.19})$$

Si la matriz es pequeña, ésta se resuelve por el método directo consistente en descomponer la matriz en un producto de dos matrices triangulares, una inferior (I) y otra superior (S):

$$A = IS \quad (A1.20)$$

Si la matriz es de gran tamaño el método directo se vuelve lento y lo mejor es recurrir a métodos iterativos. Existen varios grupos, que se clasifican (Hirsch, 1988) en métodos básicos, métodos de sobrerrelajación, técnicas con preconditionamientos y métodos de multimallado.

Los métodos básicos más usados en las técnicas numéricas son el de Jacobi y el de Gauss-Seidel. En un segundo grupo están los métodos de sobrerrelajación (derivados de los anteriores), entre los que destacan el método de sobrerrelajación de Jacobi, el método de sobrerrelajación sucesiva (SOR), el método simétrico de sobrerrelajación sucesiva (SSOR) y el método de sobrerrelajación sucesiva en una línea (LSOR). Este último con multitud de versiones, como el método puntos rojos-puntos negros y el método ZEBRA. Entre las técnicas de preconditionamiento destacan el método Richardson, el método de direcciones alternativas implícito (ADI y el acelerado AADI), los métodos altamente implícitos (SIP, como el Stone), los métodos que usan la factorización incompleta de Choleski y los métodos del gradiente conjugado.

En los últimos años, han adquirido mucho interés y se han desarrollado enormemente los métodos de multimallado (Hirsch, 1988 o Arnone et al., 1991). Estos métodos resuelven las ecuaciones en varios mallados derivados de la utilizada en la discretización espacial eliminando sucesivamente los errores mediante soluciones que son combinación lineal de las soluciones obtenidas para cada mallado. Los mallados derivados se obtienen eliminando sucesivamente puntos del mallado original y la solución en estos sub-mallados se acelera

mediante alguno de los métodos descritos anteriormente. Existen, entre otros los métodos de corrección del mallado grueso (CGC) y los métodos de dos mallados.

AI.9.- DISCRETIZACIONES TEMPORALES.

En los casos anteriores las aproximaciones se han realizado en los términos espaciales, pero no se ha mencionado el tratamiento posible de los términos temporales. En este punto conviene distinguir entre modelos estacionarios y modelos no estacionarios. En los modelos estacionarios, las derivadas temporales sólo se necesitan en resoluciones transitorias siendo nulas al llegar al régimen estacionario. Algunos métodos han incluido el término transitorio para resolver las ecuaciones de un flujo estacionario comprobando que se ha llegado a la convergencia numérica cuando este término se vuelve nulo. Por su parte, en los métodos no estacionarios se debe resolver de forma exacta el sistema de ecuaciones para cada paso temporal.

Para cada instante temporal, una vez discretizadas las ecuaciones de gobierno, el problema se reduce a un sistema de ecuaciones algebraicas que se puede resolver mediante una gran variedad de métodos estándar. Una forma general de las ecuaciones, para una variable U genérica, es la siguiente:

$$U_i^{n+1} = f(\dots, U_{i-2}^n, U_{i-1}^n, U_i^n, U_{i+1}^n, U_{i+2}^n \dots) \quad (\text{AI.21})$$

donde el superíndice n indica la iteración o coordenada espacial. En forma matricial el conjunto completo de los puntos del mallado será:

$$U^{n+1} = AU^n \quad (\text{AI.22})$$

donde “A” es la matriz de los coeficientes derivados de la discretización. Los métodos de resolución dependen de las características de la matriz “A”. En particular, se distinguen dos tipos de algoritmos: los explícitos y los implícitos. En los primeros, la matriz “A” depende únicamente de los valores de las variables en el instante n, mientras que en los implícitos, la matriz “A” depende de las variables en los instantes n y n+1. Los métodos implícitos son más estables que los explícitos aunque el coste numérico en la resolución del sistema de ecuaciones es también mayor.

A menudo es necesario introducir un factor de relajación dentro del procedimiento de iteración resolviendo, en este caso, la ecuación para un valor intermedio U_i^{n+1} , y luego relajando mediante el valor anterior U_i^n con un factor ω , donde $0 < \omega < 1$, para obtener el nuevo valor:

$$U_i^{n+1} = \omega \tilde{U}_i^{n+1} + (1 - \omega)U_i^n \quad (\text{A1.23})$$

Como ejemplo de discretización, se puede aplicar este método a una ecuación sencilla como es la ecuación de difusión no estacionaria, que consta de una derivada temporal de primer orden y de una derivada espacial de segundo orden:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (\text{A1.24})$$

Primeramente se decide el dominio del problema y a continuación se colocan puntos dentro de él para realizar la discretización de la ecuación siendo la forma más sencilla mediante un mallado, colocando los puntos (i, j) separados una longitud constante Δx en cada dirección. Una vez se haya realizado el mallado, se elige la forma de discretizar la ecuación:

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} = \frac{U_{i-1}^n - 2U_i^n + U_{i+1}^n}{\Delta x^2} \quad (\text{Al.25})$$

Usando un factor de relajación θ , se llega a la expresión:

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} = \theta \left(\frac{U_{i-1}^{n+1} - 2U_i^{n+1} + U_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{U_{i-1}^n - 2U_i^n + U_{i+1}^n}{\Delta x^2} \right) \quad (\text{Al.26})$$

En esta nueva ecuación se observa que hay una relación entre la velocidad en la iteración $n+1$ y la velocidad en la iteración n , pudiendo cambiar los nodos que deben ser consultados, lo que da lugar a dos tipos de esquemas:

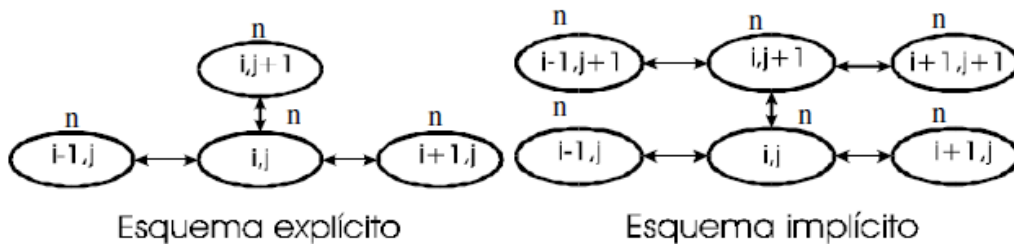


Fig. Al.1.- Diferencias entre esquemas explícitos e implícitos.

En el esquema implícito (figura Al.1) se deben resolver todas las ecuaciones para conocer todas las variables. La razón del uso de ecuaciones implícitas en vez de ecuaciones explícitas es que estas últimas necesitan pasos muy pequeños de tiempo Δt si el espaciado Δx es pequeño ya que han de cumplir la relación $\Delta t / \Delta x^2 \leq 1/2$ para asegurar la estabilidad.

En cambio, las ecuaciones implícitas no tienen este problema si se toma como factor de relajación $1/2$ (conocido como esquema de Crank-Nicholson).

Una clasificación más detallada de las distintas posibilidades puede verse en Hirsch (1988, volumen I).

AII.- GEOMETRÍAS, DISCRETIZACIONES, DIMENSIONES, DETALLE CONSTRUCTIVO REALES Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA FACHADA VENTILADA DE JUNTAS ABIERTAS Y LAS UTILIZADAS EN LAS APROXIMACIONES NUMÉRICAS.

Se muestran en este anexo el esquema de la fachada ventilada de juntas abiertas analizada y las distintas geometrías empleadas en los cálculos numéricos.

En las figuras correspondientes a las geometrías numéricas se ha buscado sobre todo aclarar algunas de las cuestiones que son discutidas en el texto a lo largo de los capítulos precedentes.

AII.1.- Geometría, dimensiones, detalle constructivo reales y características técnicas de la fachada ventilada de juntas abiertas.



Fig. AII.1. Altura total fachada ventilada de juntas abiertas objeto de estudio

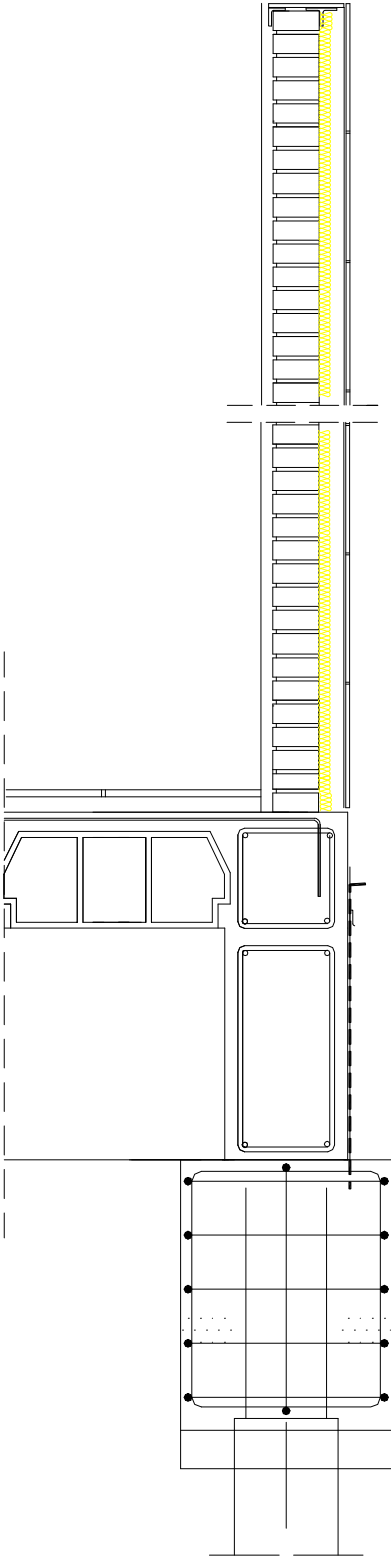


Fig. AII.2. Sección constructiva de la fachada ventilada de juntas abiertas objeto de estudio

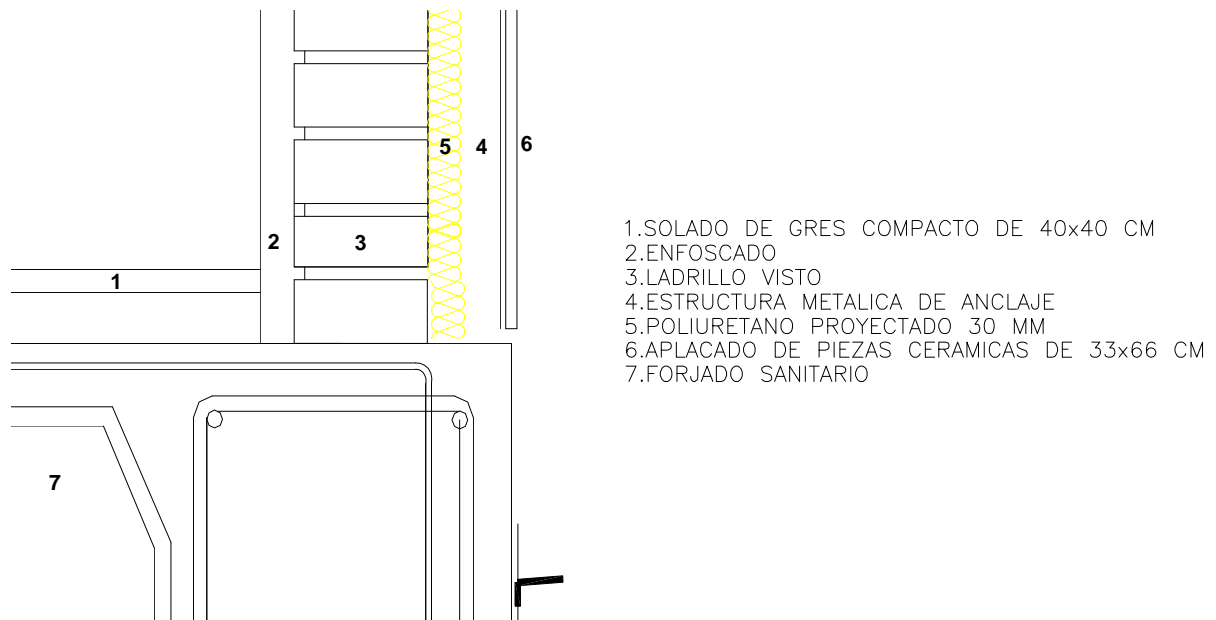


Fig. AII.3. Detalle constructivo de la junta a nivel de suelo de la fachada ventilada de juntas abiertas objeto de estudio

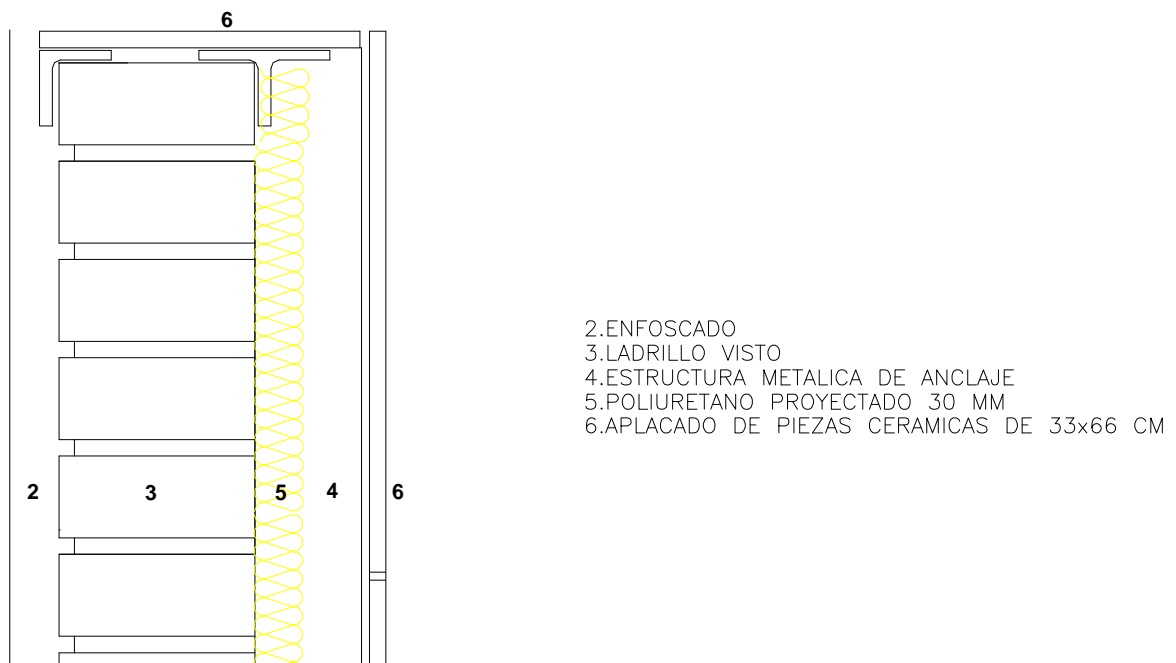


Fig. AII.4. Detalle constructivo de la junta superior de la fachada ventilada de juntas abiertas objeto de estudio

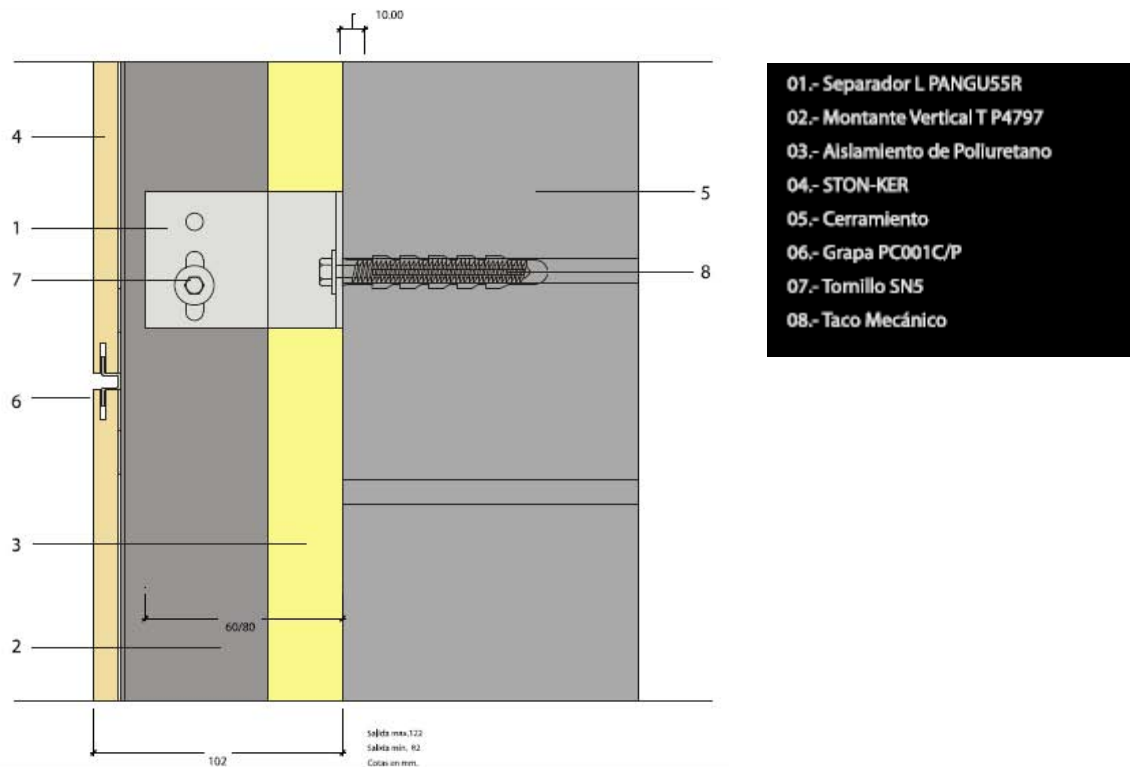


Fig. AII.5. Detalle constructivo del catalogo STON-KER (Poreclanosa), sección horizontal

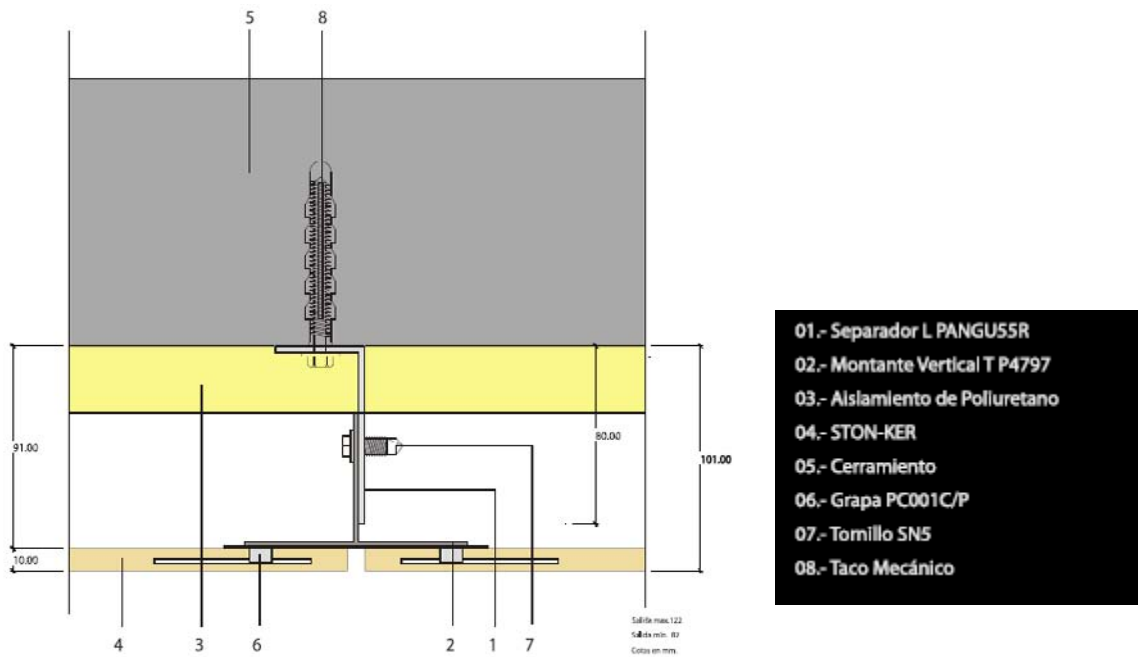


Fig. AII.6. Detalle constructivo del catalogo STON-KER (Poreclanosa), sección vertical

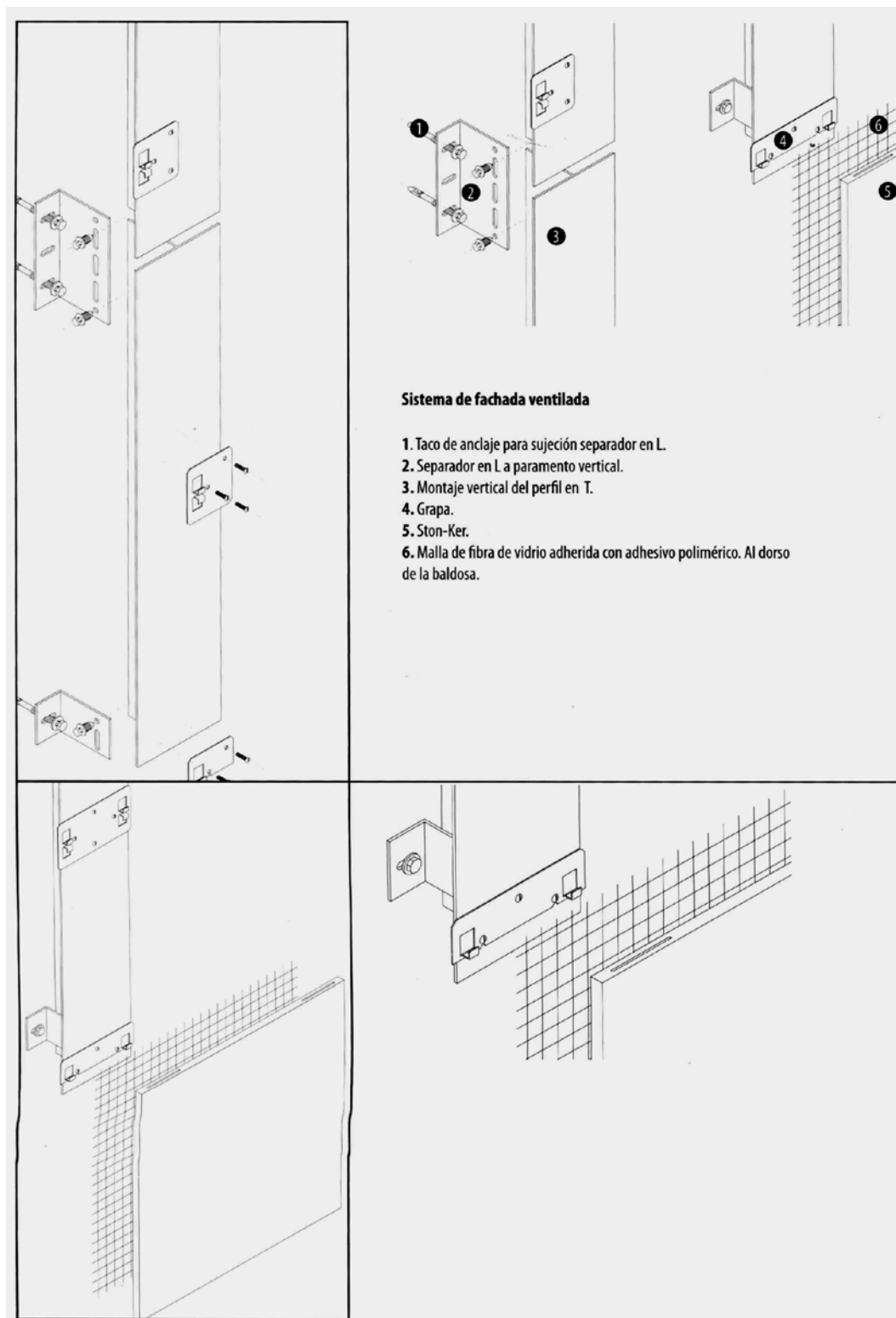


Fig. AII.7. Detalle constructivo montaje fachada ventilada de juntas abiertas objeto de estudio

Características técnicas Características técnicas	Normas de ensayo Normas de ensayo	Valores prescritos Valores prescritos	Nuestros valores Nuestros valores
Características dimensionales Longitud y anchura Comprimiento a largura Espesor Rectitud de lados Rectitud de bordes Ortogonalidad Desviación de la planitud Desvío de plantilla	ISO 10545-2	±0,6% ±5,0% ±0,5% ±0,6% ±0,5%	±0,1% ±2,0% ±0,3% ±0,4% ±0,3%
Absorción de agua Absorbido de agua	ISO 10545-3	<0,5%	≤0,1%
Resistencia a la flexión Resistencia a flexión Módulo de rotura Carga de rotura Carga de ruptura	ISO 10545-4	≥35 N/mm ² >1.300 N	≥45 N/mm ² ≥2.500 N
Resistencia a la abrasión profunda (mm ³) Resistencia a abrasión profunda (mm ³)	ISO 10545-6	Máx. 175 mm ³	≤150 mm ³
Dilatación térmica lineal Dilatación térmica	ISO 10545-8	Método de ensayo disponible Método de ensayo disponible	<6,6x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Resistencia al choque térmico Resistencia al choque térmico	ISO 10545-9	Exigido Equipado	Resiste Resiste
Resistencia al cuarteo Resistencia al cuarteo	ISO 10545-11	Exigido Equipado	Resiste Resiste
Resistencia a la helada Resistencia al hielo	ISO 10545-12	Exigido Equipado	Resiste Resiste
Resistencia al ataque químico Resistencia al ataque químico Acidos y Bases Acidos y Bases Productos de limpieza y reactivos de piscina Productos de limpieza e resistentes de piscina	ISO 10545-13	Según valores del fabricante Según valores del fabricante Min. UB	Sin ataque Sin ataque UA Cumple
Resistencia a las manchas Resistencia a manchas	ISO 10545-14	Min. 3	5

Características técnicas

STON-KER® Fachadas
Grupo de absorción agua Bla
Grupo absorción agua Bla

Documento de Idoneidad Técnica número 453

MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS NO TRADICIONALES DE CONSTRUCCIÓN
DOCUMENTO DE IDONEIDAD TÉCNICA 4.53
CONCESION

Sistema de revestimiento de fachadas ventiladas con baldosas cerámicas PORCELANOSA GRUPO FV

INSTITUTO EDUARDO TOROJA
C/ SERRANO GALVACHE, 54
28035 MADRID
España

Fabricante del producto
PORCELANOSA Grupo A.I.E.
Domicilio Social:
C/ra. N.º 348, Am. 55 B
15100 - Moaña (La Coruña)
España

Fabricante de la plantilla
PORCELAGA, S.L.
Domicilio Social:
Puerto de El Lío
15100 - Moaña (La Coruña)
España

C.B.U.F. 992.212
Benjamín de Rojas
Escritor y gerente



