

Traballo Fin de Grado

F A C H A D A S V E N T I L A D A S
E S T U D O S D O C O M P O R T A M E N T O
T E R M O D I N Á M I C O

N o a r a D í a z R o d r í g u e z

7 6 . 5 8 2 . 7 2 3 - z
R e f e r e n c i a : C o n s - 2 0
T u t o r : A n t o n i o R a y a d e B l a s

2 0 1 5 / 2 0 1 6
F e c h a d e e n t r e g a : 1 3 / 1 1 / 2 0 1 5

Escola Técnica Superior de Arquitectura
Universidade da Coruña

F A C H A D A S V E N T I L A D A S
ESTUDOS DO COMPORTAMENTO
T E R M O D I N Á M I C O

N o a r a D í a z R o d r í g u e z

T u t o r : A n t o n i o R a y a d e B l a s
Escola Técnica Superior de Arquitectura
U n i v e r s i d a d e d a C o r u ñ a

Resumo

Neste traballo móstrase un pequeno recopilatorio dos estudos do comportamento termodinámico das fachadas ventiladas para ver a relación establecida coas necesidades construtivas actuais.

Comézase vendo os puntos crave da historia das fachadas para ter unha visión xeral da evolución destas.

Para ver as necesidades construtivas desenvolvemos o funcionamento conceptual desde unha visión transversal desde diferentes ópticas, para pasar á definición e clasificación das fachadas ventiladas.

De maneira moi breve vemos os fenómenos de transferencia de calor dun edificio para entender os fenómenos de transferencia de calor das fachadas ventiladas.

É entón cando resumimos os estudos experimentais consultados das fachadas ventiladas para finalmente facer unhas reflexións do comportamento térmico e fluído dinámico e unhas conclusións onde unimos estes estudos coas necesidades construtivas actuais .

Resumen

En este traballo se mostra un pequeno recopilatorio de los estudios del comportamiento termodinámico de las fachadas ventiladas para ver la relación establecida con las necesidades constructivas actuales.

Se empieza viendo los puntos clave de la historia de las fachadas para tener una visión general de la evolución de estas.

Para ver las necesidades constructivas desarrollamos el funcionamiento conceptual desde una visión transversal desde diferentes ópticas, para pasar a la definición y clasificación de las fachadas ventiladas.

De manera muy breve vemos los fenómenos de transferencia de calor de un edificio para entender los fenómenos de transferencia de calor de las fachadas ventiladas.

Es entonces cuando resumimos los estudios experimentales consultados de las fachadas ventiladas para finalmente hacer unas reflexiones del comportamiento térmico y fluido dinámico y unas conclusiones donde unimos estos estudios con las necesidades constructivas actuales .

Abstract

In this work shows a small summary of the studies of the thermodynamic behaviour of the ventilated façades to see the relation established with the current constructive needs.

It began seeing the key points of the history of the façades to have an overview of the evolution of these.

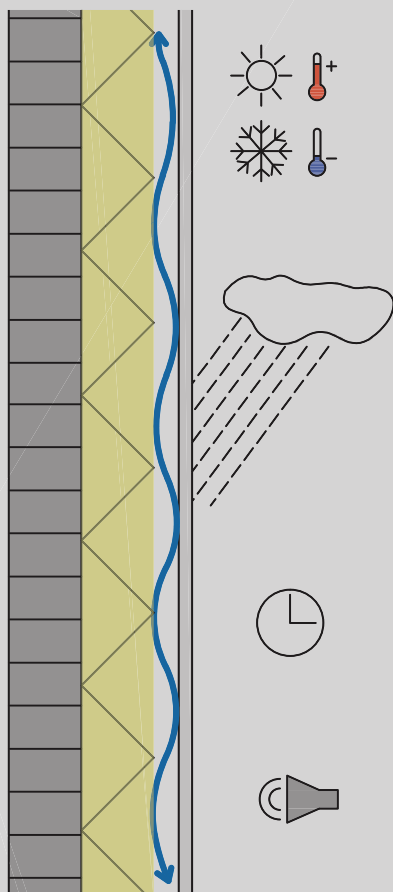
To see the constructive needs develop the conceptual operation from a transversal vision from different optical, to happen to the definition and classification of the ventilated façades.

Of way very brief see the phenomena of transfer of heat of a building to understand the phenomena of transfer of heat of the ventilated façades.

It is then when we do the summary of the experimental studies consulted of the ventilated façades for finally do some reflections of the thermal behaviour and dynamic fluid and some conclusions where join these studies with the current constructive needs .

Índice:

1	Introdución	
	1.1 Propósitos do presente traballo de investigación.	1
2	Marco histórico das fachadas ventiladas	
	2.1 Dende os sistemas construtivos tradicionais ata as fachadas ventiladas.	2
	2.2 Contexto social e científico.	3
	2.3 A construción e o impacto ambiental.	3
3	Funcionamento conceptual: visión transversal construtiva dende as diferentes ópticas	
	3.1 Comportamento fronte a auga das fachadas ventiladas de xunta aberta.	4
	3.2 Análise enerxético.	4
4	Fachadas ventiladas	
	4.1 Definición e clasificación das fachadas ventiladas.	6
5	Transmisión de calor	
	5.1 Fenómenos de transferencia de calor nun edificio.	8
	5.2 Fenómenos de transferencia de calor das fachadas ventiladas de xunta aberta.	8
6	Comportamento termodinámico	
	6.1 Os problemas do estudo do comportamento termodinámico das fachadas ventiladas de xunta aberta.	10
7	Estudos experimentais consultados da convección natural nas fachadas ventiladas	
	7.1 Medidas de diferenza de presión.	11
	7.2 Anemometría de fío quente (HW).	11
	7.3 Gas traza e visualización do fume.	12
	7.4 Anemometría Láser Doppler (LDA).	12
	7.5 Velocimetría de imaxes de partículas (PIV).	13
	7.6 Tabla resumo e comparativa das diferentes técnicas.	14
8	Estudo experimental consultado de fachadas ventiladas de xunta aberta	
	8.1 Análise fluído dinámico mediante velocimetría de imaxes de partículas PIV.	15
9	Reflexións do comportamento térmico e do comportamento fluído dinámico.	16
10	Conclusións.	17
11	Terminoloxía.	18
12	Bibliografía e outras referencias.	19



Imaxe 1. Algunhas das características básicas que debe ter un cerramento para maior confort dos usuarios. (Debuxo da autora). Nesta imaxe queremos evidenciar algunhas das características básicas como son: a redución da dispersión de calor, é dicir, menor absorción de calor nos meses cálidos e menor custo de acondicionamento; protección dos cerramentos e forxados fronte á entrada de auga e ás xeadas; bos resultados fronte a corrosión ou o deterioro por polución, mantemento simple e estabilidade cromática fronte aos axentes atmosféricos; contorna máis saudable, incrementando o confort do usuario, acorde coas esixencias básicas e protección do medio ambiente.

1 Introducción

1.1 Propósitos do presente traballo de investigación.

O presente traballo pretende achegar unha visión transversal do comportamento termodinámico da fachada ventilada de xunta aberta dende os requirimentos e prestacións construtivas dos cerramentos ata os estudos máis técnicos, buscando o equilibrio entre a investigación e a aplicación práctica, dende unha visión da construción e dos requirimentos enerxéticos actuais.

Partimos dende os fundamentos conceptuais, é dicir, vendo as fachadas ventiladas dende o punto de vista de estanquidade ao aire, á auga, como actúa fronte a presión de vento, como se pode analizar enerxéticamente, para despois disto pasar a ver o concepto de fachada ventilada e a súa clasificación.

Para ter claro o funcionamento dunha fachada ventilada veremos como son os fenómenos de transferencia de calor destas fachadas.

Antes de ver os estudos experimentais consultados veremos os problemas aos que se enfrontan estas solucións construtivas de antemán.

Afondaremos máis concretamente nun estudo de fachadas ventiladas de xunta aberta e con isto faremos unhas reflexións sobre o comportamento térmico e o comportamento fluído dinámico, para rematar con unhas conclusións donde se deduce a necesidade desa relación directa que debería existir entre os estudos máis técnicos e as análises de aplicación máis xerais para así poder chegar a unhas condicións axeitadas en cada construción, ademais das xa evidentes como a estabilidade, chegar ao maior confort posible para o usuario (ver imaxe 1).

2 Marco histórico das fachadas ventiladas

2.1 Dende os sistemas construtivos tradicionais ata as fachadas ventiladas.

Esta visión xeral histórica-tecnolóxica que fago neste traballo é unha reinterpretación da parte de historia da tese de Giancola (2010)¹ xa que me resultou interesante o enfoque que marca neste punto sobre a evolución dos sistemas construtivos.

Giancola (2010)¹ dice que é na arquitectura primitiva na que durante moitos anos as edificacións son construídas con muros de carga de materiais pesados que ademais é tamén o sistema de peche (ver imaxe 2). Na Idade Media o gótico mediante un sistema estrutural de nervaduras dirixe as cargas aos arcos ou contrafortes, de tal xeito que os muros pasan a ser finos.

Partimos da base de que empregaban os materiais dispoñibles no media de implantación e con unha moi baixa manipulación destes.

Como un dos primeiros materiais de construción temos a madeira que ademais se utilizaba como combustible e como arma defensiva. Con ela constrúan unha cabana con estrutura de madeira e cuberta por ramas para protexerse fronte á intemperie.

Outro material empregado é o ladrillo de arxila, usado durante mais de seis milenios, pasando despois aos ladrillos cocidos xa con medidas establecidas e empregando o betún como primeiro revestimento fronte as choivas.

Como nos di Giancola (2010)¹, é na arquitectura asiría onde se emprega moito mais a pedra, unha pedra caliza fina e xesosa.

Pero o gran cambio parece ser que xorde na mastaba (vivenda de faraóns) formadas por ladrillos de barro e dotadas de paredes con paneis e con cavidades cheas de escombros, para obter unha temperatura interna mais baixa.

Os romanos prestaban especial interese a degradación dos materias de revestimento e intentaban buscar solución fronte a aparición de humidade. (Giancola (2010)¹)

Según Giancola (2010)¹ xa Vitruvio no século I a.C. recomendaba na planta baixa un pedestal de 0,90cm de xeso, mesturado con ladrillo cocido no canto de area e revestir de estuco, pero si seguía a humidade propuña facer unha parede interior separada un pouco da outra provocando unha canle (cámara bufa) entre elas con aberturas para o aire e si esta parede non era posible recomenda o que hoxe coñecemos como barreira de vapor, é dicir unha capa impermeable en colocación vertical.

De modo que as paredes ventiladas xa existían en época romana, para eliminar a humidade e condensación, e para producir calor artificial desde abaixo. E tamén existían nas termas para permitir quentar as paredes facendo circular o vapor de auga (ver imaxe 3).

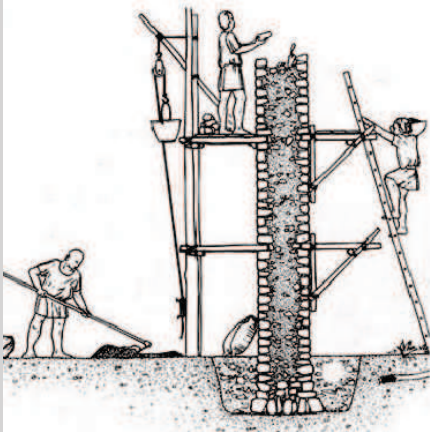
Polo tanto, a modo de resumo, pódese dicir que dende a arquitectura primitiva os muros de carga xa se baseaban en dúas paredes; con un recheo de escombros, barro, pedras pequenas, etc. entre elas. Este sistema construtivo servía como protección (seguridade, axentes climatolóxicos), pero fronte a auga xeraba problemas posto que a auga penetraba ata o recheo donde producía presións que o muro non podía soportar e humidades.

Séculos despois vacíase a cámara (cavity wall) e xérase por tanto unha cámara baleira drenante, e coa aparición de illamentos de baixa calidade, como podía ser o serrín por exemplo, ocúpase de novo esa cámara.

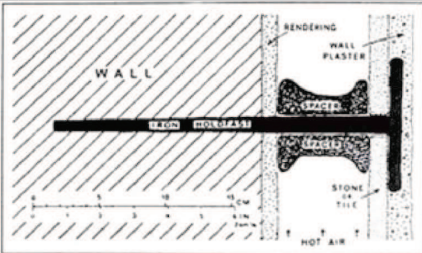
Cando se incrementa a altura das construcións debido a aparición dos sistemas porticados eos forxados de hormigón necesítase unha maior fixación da parede exterior e é cando se chega co forxado de hormigón ata a folia exterior. Isto implica a interrupción da cámara e prodúcese de novo a entrada de auga.

En consecuencia, décadas despois surxe a solución das fachadas ventiladas (rain-screen) para solucionar o problema da auga.

¹ E. Giancola, "El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas" (tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2010), 105-114.

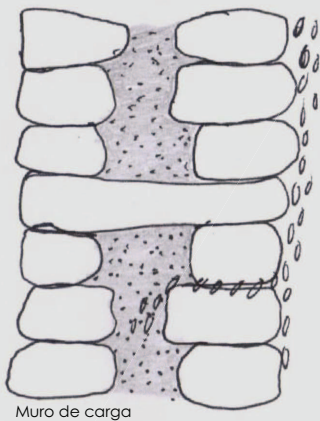


Imaxe 2. Exemplo de muros de carga. (Geotecnia). Estes muros de carga ademais eran sistema de peche, e conseguían protexerse da auga e do frío, pero tiña tamén limitacións como o gran espazo que ocupa, coste elevado de man de obra e material e a complexidade na realización de ocós.



Reconstruction of use of baked clay 'spacer' and iron hold-fast. After J.H. Money

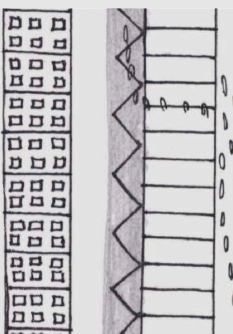
Imaxe 3. "Wall-spacer" del British Museum, según J.H. Money, citado por A. Raya de Blas en el artículo El pegado elástico en fachadas trasventiladas de piedra. Reconstrucción do detalle de dobre pel con cámara de circulación de aire quente, onde un cravo de ferro cun separador do mesmo material, ancora a un muro revestido unha folia de pedra ou azulexo cun acabado de xeso que oculta a cabeza da ancoraxe.



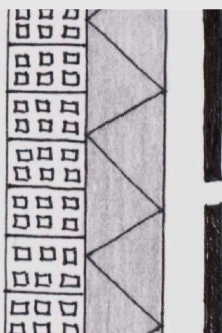
Muro de carga



Cavity wall



Fachada convencional



Fachada ventilada

Imaxe 4. Esquema evolución das fachadas (Debuxo da autora). No ámbito onde estamos a entrada de auga nun muro masivo era evidente, polo tanto pasase a separarse en dúas capas e a intalarse entre elas unha cámara de drenaxe, máis tarde aparece o illamento. E como os problemas coa auga e o illamento térmico seguían surxiu entón a fachada ventilada donde a parede exterior exerce de paraugas e o illamento se instala no exterior da parede portante.

A fachada ventilada o que debe cumprir por tanto é que a parede exterior sexa estanca ao aire, posto que a estanquidade a auga xa o conseguimos ca cámara equipotencial como veremos máis adiante; que o illamento sexa ríxido para que non varíen as presións na cámara e non debemos esquecer o cumprimento da protección fronte o lume. Vese esta evolución das fachadas na imaxe 4.

2.2 Contexto social e científico.

Asombra ver o realmente integradas que están as fachadas ventiladas dentro do contexto construtivo actual xa que se están colocando tanto en edificios de nova construción como en rehabilitacións. As publicacións científicas son moitas pero son enfoques parciais. E respecto aos estudos experimentais os resultados das diferentes propostas son moi variables. Por esta razón as técnicas construtivas seguen avanzando rexéndose por criterios de adaptación ó uso, xa que non existen realmente un sistema de fachada que solvete todos os requerimentos que veremos máis adiante.

2.3 A construción e o impacto ambiental.

A fachada como elemento construtivo de calquera edificio, é obxecto de especial coidado no deseño arquitectónico por ser a parte do edificio percibida desde o exterior, de aquí a relación directa coa coherencia urbana, o prestixio e a calidade arquitectónica. Estas esixencias estéticas non se poden desprezias a hora de elixir a solución técnica. A fachada experimentou multitude de transformacións ao longo da historia pola súa condición de soporte para os distintos estilos arquitectónicos, pero con todo os maiores cambios son consecuencia da evolución das técnicas construtivas.

Tradicionalmente, a fachada foi ao mesmo tempo a estrutura e o cerramento do edificio, e por tanto a capacidade de abrir ocos para iluminar, ventilar ou dispor de vistas ao exterior foi limitada, aínda que no gótico xa se incrementaron os ocos. O desenvolvemento histórico da fachada foi unha carreira tecnolóxica a favor de ampliar estes ocos. Na arquitectura contemporánea, a fachada evolucionou nunha nova dirección, cara á mellora da calidade do interior do edificio. Pásase da obsesión pola transparencia e a luz a unha preocupación recente polo comportamento enerxético dos cerramentos. Desde este novo punto de vista foi e é motivo de experimentación dos novos sistemas tecnolóxicos construtivos e de novos materiais a favor de buscar a unión da maior eficiencia enerxética e o valor estético do edificio ademais de incrementar as prestacións.

Nun pasado cando os cambios e a innovación tecnolóxica non estaban tan avanzados na edificación todo se solucionaba co espesor. Fronte ao frío exterior, maior espesor; mais carga, maior espesor; mais choiva, mais espesor. Despois disto pasouse a especialización de capas como xa explicamos donde na separación de capas xa existentes sustitúese o recheo dos muros a dúas caras por unha cámara vacía na que posteriormente se coloca o illamento cando estes teñen unha calidade aceptable, chegando a actual capa de illamento donde o aumento do espesor e a mellora dos materiais produce un cambio radical.

O reto técnico que se busca nas fachadas é que esta sexa un elemento que con menos espesor controle: o fluxo térmico, o fluxo do aire, o vapor de auga, o movemento da auga, a durabilidade dos materiais, a acústica, o comportamento fronte o lume e a resistencia e rixidez. Xa que un cerramento debe cumprir os requirimentos e prestacións tales como: estanquidade, estabilidade estrutural, resistencia ao lume, illamento térmico e acústico, seguridade a impactos e vida útil. Estes pola parte técnica pero non debemos esquecer os requirimentos e prestacións arquitectónicas, que en moitos casos son as determinantes.

Por outra parte a situación enerxética e medioambiental do momento require que a edificación consuma e contamine o menor posible, xa que está comprobado que cos debidos criterios de eficiencia enerxética pódese aforrar ata un 80% (Giancola 2010)² respecto a una construción tradicional. Temos técnicas naturais como por exemplo a radiación solar que é un valioso foco de calor para calefactar no inverno. Tamén é certo que no verán non hai un foco frío para refrixerar de modo que se debe investigar en sistemas naturais para que aforrando enerxía se logre o confort térmico desexado.

² E. Giancola, "El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas" (tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2010), 23.

3 Funcionamento conceptual: visión transversal construtiva dende as diferentes ópticas

3.1 Comportamento fronte a auga das fachadas ventiladas de xunta aberta.

Para falar do comportamento destas fachadas coa auga Brookes e Meijs no seu libro (2008)³ explicannos de maneira moi clara as forzas que moven a auga da superficie a través de calquera abertura existente.

Este é un punto moi importante xa que na tradición un requirimento esencial era a ausencia de entrada de auga (a enerxética, acústica, etc. son moito despois).

No libro fálanos de que coa presenza do vento a auga tamén pode fluír lateralmente ou mesmo cara arriba. De tal maneira que o fluxo lateral baixo a presión do vento é maior preto das esquinas de barlovento do edificio, e o fluxo ascendente é maior preto ou na parte superior da fachada de cara ao vento. O fluxo lateral tamén se concentrará nas irregularidades verticais na superficie da parede, xa sexa proxeccións ou depresións. En xeral, o fluxo de auga nas xuntas verticais é moito maior que o caudal medio de auga sobre a parede.

As forzas que actúan para mover a auga da superficie a través de calquera abertura existente son seis, como podemos ver na imaxe 5.

Tradicionalmente para loitar contra as correntes de vento e a diferenza de presión tentábase eliminar todas as aberturas mediante o uso dun selo hermético que fallaba antes ou despois, por iso na actualidade considérase máis eficaz e fiable eliminar o diferencial de presión a través da abertura. Por iso esta é a base da fachada ventilada. Mostramos entón na imaxe 6 as características da construción da parede de presión equilibrada.

Por tanto a parede de presión equilibrada consiste nunha pel exterior (a pantalla de auga) e unha parede interior cun espazo de aire entre elas.

Esta é por tanto a teoría básica, pero na práctica as presións positivas nunha fachada preto do chan son moito menores que preto da parte superior, e nas esquinas son xeralmente maiores debido as turbulencias. De modo que un requisito importante sería a existencia dun número de aberturas espazadas ao exterior. En conclusión a cámara da pantalla de auga (parede exterior) debe ser subdividida en áreas relativamente pequenas cunha abertura de tamaño limitado en cada compartimento ao exterior.

Hai que ter en conta tamén a importancia de manter a parede interior totalmente selada xa que calquera fuga de aire daría lugar á caída de presión no aire movido na cámara de aire e o interior. Polo tanto hai que prestar atención ao illamento, xa que de non ser ríxido poderían variar as presións na cavidade.

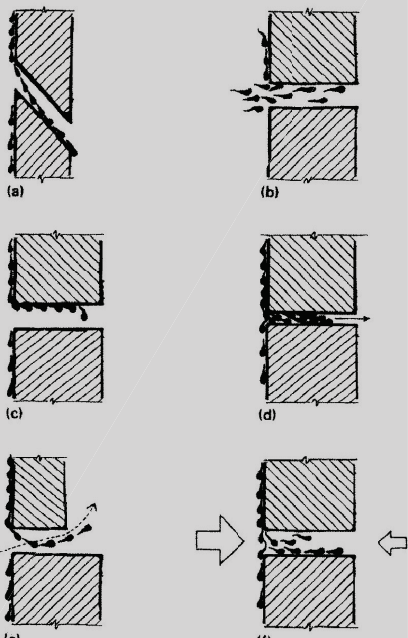
Con estas explicacións da forza da auga podemos entender que a orixe das fachadas ventiladas chega como solución fronte a entrada de auga.

3.1 Análise enerxético.

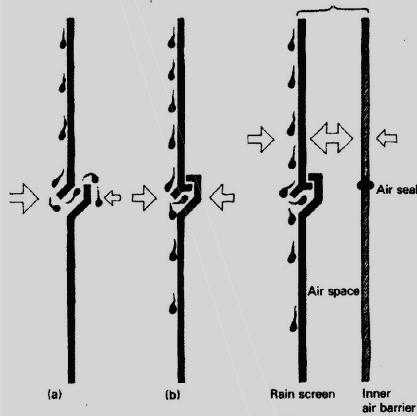
Consultando análises enerxéticas das fachadas ventiladas vemos as virtudes e inconvenientes destas fachadas a hora de construír con elas. Como exemplo tomamos unha análise realizada en Madrid (España) por Zarzalejo en 1995⁴, xa que é un clima continental Mediterráneo segundo a clasificación do clima de Köppen según Zarzalejo (1995)⁴, con invernos fríos, veráns calorosos, baixas precipitacións e altos niveis de radiación solar. Mantense a temperatura interior do edificio nun valor constante de 24°C, tomando orientacións Sur e Norte e elíxense días típicos, nunca extremos. Esta análise faise cunha fachada ventilada e unha fachada de cavidade selada para ver as diferenzas. Para as dúas fachadas se empregan os mesmos materiais.

³ A. J. Brookes y M. Meijs, Cladding of Buildings (Taylor & Francis, Trowbridge, Wiltshire, 2008), 1-9

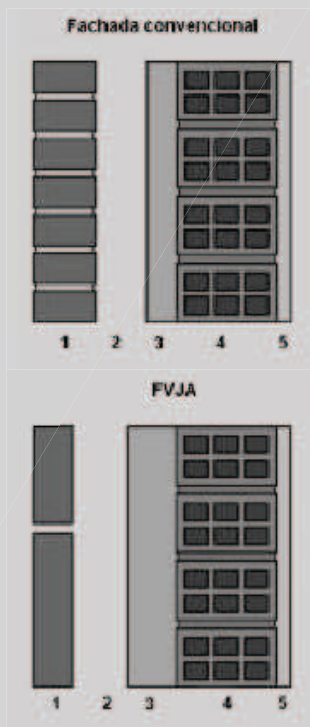
⁴ L.F. alejo, F.M. Téllez, E. Palomo, M.R. Heras, "Creation of typical meteorological years (TMY) for Southern Spanish cities" International Symposim Passive Cooling of Building. Athens, Greece (1995).



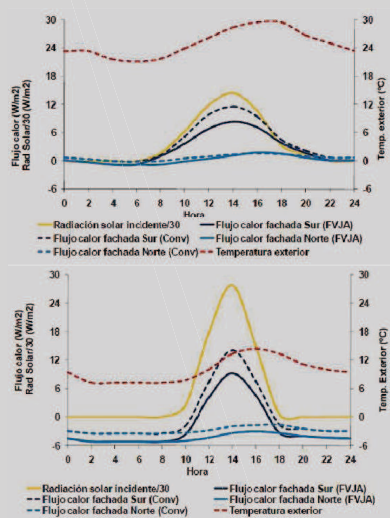
Imaxe 5. Esquema das forzas que actúan para mover a auga (Cladding of Buildings). No esquema (a) a forza da gravidade, no (b) a forza é a enerxía cinética na cal as pingas de auga poden achegarse á superficie da parede con velocidade considerable e o seu impulso pode levar a auga a través das aberturas, no (c) a tensión superficial que é a que dá á auga a capacidade de aferrarse a fluír ao longo dunha superficie horizontal, no (d) a capilaridade que se produce no pequeno espazo que separa dúas superficies, no (e) as correntes de aire que poden ser resultado de diferenzas na presión do vento sobre a superficie da parede ou da convección dentro das cavidades da parede e poden levar a auga á parede, e por último o (f) a diferenza de presión, é dicir, se a auga está presente nun lado dunha abertura e a presión de aire nese lado é maior que no outro lado a auga móvese a través da abertura, esta diferenza de presión pode ser causada polo máis suave dos ventos.



Imaxe 6. Construción da parede de presión equilibrada (Cladding of Buildings). No esquema (a) indícase como, coa presión maior no exterior, a auga é normalmente aspirada a través da articulación; no esquema (b) móstrase a condición na que as presións sobre os dous lados da superficie exterior fanse iguais, evitando así a fuga por gravidade, por enerxía cinética, por tensión superficial ou pola acción de capilaridade; e no esquema (c) móstrase como, co fin de resistir os efectos das correntes de aire e a presión do vento, un espazo de aire continuo debe ser proporcionado entre os revestimentos interior e exterior da construción.



Imaxe 7. Esquema das diferentes capas que compoñen a fachada convencional tipo e a fachada ventilada de xuntas abertas tipo (Cristina San Juan). 1. Capa de recubrimento exterior de 10mm de espesor (recubrimento continuo na fachada convencional e plaquetas de 1.2m de ancho, 0.6m de alto e 0.01m de espesor para a fachada ventilada de xuntas abertas). 2. Cámara de aire de 50mm de espesor. 3. Capa de illamento de la de roca de 30mm de espesor. 4. Ladrillo hueco de 110cm de espesor. 5. Capa de xeso da cara interior 10mm de espesor.



Imaxe 8. Comportamento enerxético (Cristina San Juan). Comparativa entre a fachada ventilada de xunta aberta (FVJA) e a fachada convencional (Conv) un día tipo de verán (gráfico superior). Comparativa entre a fachada ventilada de xunta aberta (FVJA) e a fachada convencional (Conv) un día tipo de inverno (gráfico inferior).

Vemos na imaxe 7 un esquema das diferentes capas que compoñen a fachada convencional tipo e a fachada ventilada de xuntas abertas tipo coas que se fai esta análise.

Como resultados obtense que na fachada ventilada o seu funcionamento máis eficaz en termos de enerxía é na fachada sur e no verán. Xa que nas horas de radiación a fachada ventilada transmite un 26% de calor menos que a fachada convencional. A fachada norte ventilada compórtase mellor durante o día.

No inverno, a calor transferida ao interior do edificio na fachada ventilada orientada ao sur é un 58% inferior ao transmitido por unha fachada convencional, e na fachada norte as perdas son mesmo maiores. Nas noites de inverno, as perdas de calor son un 50% maior nas fachadas ventiladas nas dúas orientacións.

Respecto da enerxía necesaria para calefacción e refrixeración durante o día no verán é de 20% menos na fachada ventilada en orientación Sur e case igual no Norte. Pero no inverno a necesidade de enerxía é un 27% maior nas dúas orientacións.

A pesar de que esta análise se realiza nunha situación concreta, con xeometrías, materiais, estrutura e condicións climáticas concretas, olvidándonos de outros requirimentos, de forma xeral podemos falar de que as fachadas ventiladas poden considerarse enerxéticamente máis eficientes que as fachadas convencionais cando se colocan en fachadas Sur e en climatoloxías con veráns calorosos e invernos suaves. Pero por outra banda as fachadas ventiladas dan mal resultado en invernos severos e en fachadas Norte.

Nesta análise percíbese a diferenza do funcionamento desta fachada en verán ou en inverno como podemos ver na imaxe 8. Isto implica que por exemplo en países mediterráneos, en edificios de oficinas ou edificios públicos con alta ocupación onde se require refrixeración no inverno a maiores da refrixeración no verán, por tanto é nestes edificios onde as fachadas ventiladas poden ser factíbeis.

Dende esta análise meramente enerxética e autista e coa aparición dos novos conceptos de illamento térmico non teñen sentido estes estudos sobre o comportamento das fachadas vendo os novos espesores de illamento como é o caso da vivienda superillada e superestanca (passivhaus) xa que as construcións pasan a estar illadas totalmente do exterior.

Neste traballo por tanto centrámonos nos diferentes estudos do comportamento fronte a auga e a análise enerxética que acabamos de ver, e os estudos do comportamento termodinámico que veremos máis tarde; e sacamos conclusións como a reflexión sobre as vivendas superilladas pero ademais hai moitas outras cousas que deberíamos ter en conta neste tipo de fachadas e que quedan fóra do alcance destes estudos. Poderíamos falar de moitos aspectos pero simplemente para ver a complexidade que ten o estudo destas fachadas numero aquí algúns aspectos que chama a atención ao consultar os diferentes artigos⁵, libros, páxinas web...

Por tanto ademais do estudado neste traballo, teríamos que ter en conta outros aspectos no estudo destas fachadas, algúns deles son:

Comportamento do lume, o deseño dos puntos débiles de cada fachada en particular, a gran variedade de ancoraxes e tomar conciencia de se é necesario un illante adicional nestes puntos de ancoraxe, asegurar a drenaxe na cavidade, o grosor das pezas exteriores ademais dos posibles materiais e por último ter en conta aumentar o grosor das plaquetas preto do nivel do chan para prever a ruptura causada por flexión, pero isto tamén depende dun bo deseño.

⁵M. de los Ángeles, J. Gutiérrez, E. Gil, A. Gil e V. Galván, "Recomendaciones de diseño y construcción para mejorar la impermeabilidad pantalla de lluvia en las paredes construidas con revestimiento de piedra natural," Construcción y Materiales de Construcción 25 (2011) 1753-1761.

4 Fachadas ventiladas

4.1 Definición e clasificación das fachadas ventiladas.

A técnica coñecida como fachada ventilada hoxe en día, utilízase este termo de maneira comercial, non sempre responde as características reais deste sistema.

A parede ventilada baséase nun sistema de capas onde o aire pasa entre dúas paredes verticais como nos exemplos das imaxes 9 e 10. A fachada ventilada pode estar composta por combinación e enlace de dous sistemas diferentes ou realizar un oco na estrutura de peche vertical, coas aberturas indispensables para asegurar a ventilación.

Xa no ano 2000 Angelo Lucchini explica a fachada ventilada como un "muro opaco ... cuxo revestimento exterior está composto de elemento diferentes (diferente forma, tamaño e materiais) ... montados a través de sistemas de suspensión e fixación de tipo mecánico ou químico-mecánico, e cuxo outro lado está separado da parte frontal da parede interior, no que adoita haber un panel illante non absorbente ou máis ben un obstáculo para a auga e logo un illante de lá, por medio dunha cámara non moi ancha ou de toda forma de tamaño suficiente para deter a continuidade física entre a pel exterior e as capas da parede interior, e para permitir o paso do aire."⁶

En resumo para que un cerramento exterior poida acollerse ao concepto de fachada ventilada é necesaria a disposición de mover o aire quente que ascende até o cumo do edificio e que o expulse, polos ocos provistos na cima do edificio.

A parede ventilada non só consiste en garantir as propiedades dos elementos empregados na parede exterior, senón que ademais debe existir unificación co resto dos compoñentes como, as características termodinámicas da parede interior ou as peculiaridades da subestrutura, normalmente metálica, que sustenta a parede exterior

Nas fachadas ventiladas segundo a técnica de revestimento exterior en seco, organízanse en distintos tipos de fachada, onde se inclúen as fachadas térmicamente illadas, a clasificación é:

- a) Sistemas de fachadas ventiladas pechadas, xuntas pechadas.
- b) Sistemas de fachadas pantalla ou de xuntas abertas.

Esta clasificación baséase na ventilación como principio das técnicas de revestimento en seco e desta maneira diferenciar o comportamento e a achega á eficiencia térmica da pel do edificio.

Nos sistemas de fachadas ventiladas pechadas a técnica consiste na existencia dunha cámara de aire para formar unha discontinuidade entre o interior e o exterior, que ademais aumenta a capacidade termo-enerxética do edificio. É dicir, no verán o fluxo de aire que se xera de abaixo cara arriba para ser expulsado na cima do edificio impide o recalentamiento das paredes, co que se consegue diminuír a calor que se transmite ao edificio e isto tamén nos dá a posibilidade de evacuar o exceso de vapor de auga existente na cámara de aire. No inverno, a existencia de aire na cámara diminúe a perda de calor. Por todo isto e se ademais engadimos que as proporcións entre o consumo de aire, a folgura da cámara e a técnica estrutural sexan adecuadas, e tendo en conta as propiedades e o procedemento dos compoñentes do revestimento; esta técnica é capaz de diminuír as cargas de enerxía no interior do edificio.

Algo moi característico desta técnica é a protección ante os axentes atmosféricos, a simple existencia dunha pantalla opaca polo exterior da parede interior do edificio, resgárdanos da radiación directa, posibilita o control do soleamiento e por tanto conseguimos diminuír a carga de calor do edificio no verán.

⁶A. Lucchini, "Le pareti ventilate; metodologia di progettazione e messa in opera di material e componente," Milano, edizione il Sole 24 Ore, settembre 2000, 4.



Imaxe 9. Detalle construtivo 1 (foto da autora). Maqueta da sección construtiva das vivendas de Astana exposta no departamento de construción da ETSAC, realizada polos alumnos Iago Otero Regueira e Miriam Nuñez Guerrero.



Imaxe 10. Detalle construtivo 2 (foto da autora). Maqueta da sección construtiva dunha fachada ventilada exposta no departamento de construción da ETSAC, realizada polos alumnos Isabel Rendo Riveiro e Santiago Tarrío Goy.

Deste xeito a parede exterior ten dúas función, por unha banda reflectir a radiación solar e impedir o recalentamiento das paredes do edificio e por outro ceder parte da calor almacenada dentro da cámara de aire, para desta forma impulsar o efecto chimenea e xerar así a ventilación natural.

Ademais de protexernos contra o vento e a choiva este sistema evita as pontes térmicas e a existencia de condensación intersticial grazas a que o revestimento exterior está separado da parede interior como podemos ver por exemplo na imaxe 11.

As xuntas seladas eliminan a auga por gravidade supoñendo que non existen turbulencias provocadas pola xunta selada.

A xunta aberta funciona por compartimentación en cámaras equipotenciais de presión que permiten, outra vez a actuación da forza da gravidade.

As fachadas ventiladas de xunta pechada deben ter drenaxe inferior e ventilación superior (nas fachadas ventiladas de xunta aberta xa é evidente).

Nos sistemas de xuntas abertas xérase unha especie de ventilación horizontal non vertical que axuda pausadamente ao cambio de aire e en consecuencia á dehumidificación e á refrixeración no verán.

A estrutura de apoio é a mesma para as fachadas de xunta aberta e as de xunta pechada, as diferenzas que existen son en tema de deseño de ancoraxes das placas que obedecen a cada tipo de fachada, as formas xeométricas e o material da placa.



Imaxe 11. Detalle construtivo 3 (foto da autora). Maqueta do triedro de cuberta dunha fachada ventilada de pedra exposta no departamento de construción da ETSAC.

5 Transmisión de calor

5.1 Fenómenos de transferencia de calor nun edificio.

Para coñecer como funciona a transferencia de calor dunha fachada ventilada vamos ver primeiro a transferencia de calor dos diferentes elementos dun edificio para coñecer os fluxos de enerxía xerais que se producen nunha construción.

Para explicar isto rapidamente vemos a imaxe 12 que atopamos na tese doutoral de Giancola (2010)⁷ donde nos mostra de maneira xeral os fenómenos de transferencia de calor nos diferentes elementos que compoñen un edificio.

5.2 Fenómenos de transferencia de calor das fachadas ventiladas de xunta aberta.

Para analizar a transferencia de calor destas fachadas vemos como o fai San Juan (2011)⁸ na súa tese separando a parede exterior da parede interior e a cavidade e fago polo tanto un resumo da súa explicación.

Comezamos pola parede externa que é a que recibe a radiación solar, a cal parte se reflicte (dependendo das propiedades do elemento exterior) e outra parte é absorbida pola parede. Na propia parede exterior hai dous intercambios de calor, un radiativo causado pola diferenza de temperatura entre a contorna e a superficie da parede exterior, e o outro un intercambio de calor convectivo debido á diferenza de temperatura e á velocidade do vento.

Si falamos da cara interior da parede exterior, é dicir a cara interior das plaquetas, existe un intercambio de calor radiativo respecto da parede interior e un intercambio de calor convectivo co aire da cavidade. A parede exterior está colgada nos puntos das fixacións pero dado que a área destes puntos polo coeficiente de transmisión térmica fainas desprezables fronte ao problema xeral.

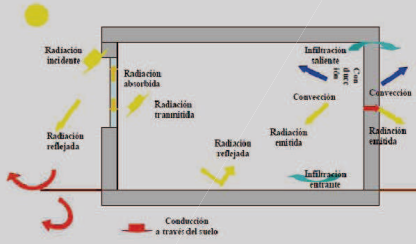
Por tanto a parede interior funciona de maneira similar, fóra da radiación solar. Como xa dixemos na cavidade existe un intercambio radiativo entre a parede interior e as plaquetas exteriores e tamén un intercambio de calor convectivo de ambas as paredes co aire da cavidade. Pero ademais na parede interior prodúcese tamén o intercambio radiativo coas demais paredes da habitación, e o intercambio convectivo co aire da propia habitación.

É no comportamento do aire na cavidade onde se marca a diferenza entre as fachadas convencionais con cavidade selada (tipo cavity wall) e as fachadas ventiladas de xunta aberta. Posto que na cavidade dunha fachada convencional o intercambio de calor obtense debido a un bucle convectivo que ascende pola parede máis quente, entendendo que é a parede exterior debido a que recibe radiación solar, absorbendo esta parte da calor que logo transmite á parede interior, que é a parede fría, mentres descenda por ela (visión de país cálido). Deste xeito sucede o mesmo coa calor radiativa polo que podemos dicir que toda a calor liberada a través da superficie interior da parede exterior é absorbida pola parede interior e transferida ao interior da habitación. En consecuencia dedúcese que a temperatura media do aire na cavidade será un valor intermedio entre as temperaturas das dúas paredes.

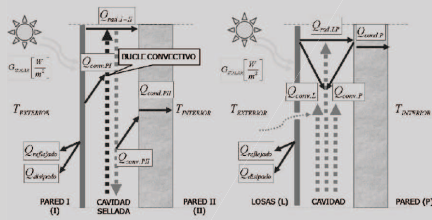
No caso das fachadas ventiladas de xunta aberta o aire pode entrar e saír da cavidade ventilada por tanto parte da calor de convección entre as plaquetas, xa que supomos que reciben radiación solar e están a maior temperatura que o ambiente, e a cavidade vai ser enviada maiormente á atmosfera de tal forma que non se transmita ao interior do edificio. Dedúcese entón que o fluxo convectivo entre a cavidade ventilada e a parede interior é inferior que nas fachadas convencionais. Isto é todo moi relativo posto que hai que ter en conta que a parede exterior pode estar mais ou menos quente dependendo do clima e da radiación solar e non debemos de esquecer a climatización interna.

⁷E. Giancola, "El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas" (tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2010),93-94.

⁸C. San Juan, "Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta" (tesis doctoral, Universidad de Oviedo, Madrid, 2011),12-15.



Imaxe 12. Esquema de fluxos de enerxía nun edificio unizona (Giancola). Neste esquema podemos ver: a condución a través dos muros e superficies acristaladas exteriores, a condución a través do chan, a convección externa entre as superficies exteriores e o aire exterior, a convección interna entre as superficies interiores, como son os cerramentos, mobiliario, ocupantes, etc. e o aire interior, a radiación de onda curta procedente principalmente do sol e de fontes internas (tamén de lámpadas, etc.), a radiación exterior de lonxitude de onda longa entre as paredes exteriores e a bóveda do ceo, os edificios circundantes e o chan, a radiación interior de lonxitude de onda longa entre as diversas superficies interiores en función das temperaturas e os procesos de intercambio de masa entre a contorna e o interior do edificio así como entre zonas.



Imaxe 13. Transmisión de calor (San Juan). Mecanismos de transmisión de calor dunha fachada convencional (esquerda) e unha fachada ventilada de xuntas abertas (dereita).

Como resumo, os fluxos de calor na cavidade e as temperaturas varían coa altura. Na fachada convencional o aire na cavidade quentase ao ascender pola parede exterior e arrefriase ao baixar pola parede interior, pero hai que ter en conta que o fluxo na fachada convencional córtase por os forxados, polo que non hai tiro e a ventilación é moi baixa. Na fachada ventilada de xunta aberta o aire entra a temperatura ambiente e quentase ao subir pola cavidade ata saír pola parte superior. De tal modo que a transmisión de calor por convección aos dous lados da cavidade é totalmente distinta: na fachada convencional existe unha convección natural máis ou menos simple sobre unha superficie vertical, pero na fachada ventilada a convección está determinada pola entrada e saída do aire a través das xuntas abertas, o que xera discontinuidades no campo térmico e fluído e depende tamén das características xeométricas da fachada.

De maneira esquemática a imaxe 13 móstranos os mecanismos de transmisión de calor dunha fachada convencional e os de unha fachada ventilada de xuntas abertas.

Como apunte xeral do conxunto de traballo quería destacar neste capítulo a gran diferenza entre o fluxo de calor e o fluxo da auga do que xa falamos no capítulo 3.1

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12

6 Comportamento termodinámico

6.1 Os problemas do estudo do comportamento termodinámico das fachadas ventiladas de xunta aberta.

San Juan (2011)⁹ na súa tese fálanos dunha serie de problemas do estudo do comportamento termodinámico destas fachadas ventiladas de xunta aberta que me parece axeitado mostrar aquí por ser o tema que trataremos máis especificamente e que resumo aquí:

Comezaremos falando que a existencia desas xuntas abertas entre plaqueta e plaqueta (como podemos ver na imaxe 14) que deixa entrar e saír o aire libremente por toda a cavidade ventilada dificulta a análise enerxética deste tipo de construción, xa que o seu comportamento térmico obedece ao que se produce no interior da cavidade ventilada, que esta á súa vez é dependente e variable coas condicións climáticas exteriores, é dicir, a temperatura, a radiación solar incidente e o vento.

É moi difícil concretar o comportamento térmico destas fachadas tamén debido á gran variedade de composicións posibles e de deseños existentes no mercado. Por exemplo as plaquetas ou laxas do revestimento exterior poden ser de diferente material, metálicas, cerámicas, de pedra ou de materiais compostos. Ademais disto as dimensións destas laxas, o espesor e o remate das xuntas varían segundo o comerciante. A maiores disto tamén a gran variedade de tipoloxías diferentes para a sub-estrutura metálica e os sistemas de ancoraxe, dos cales depende o espesor da cámara ventilada.

Os valores existentes para determinar o comportamento enerxético das fachadas, como é o coeficiente global de transmisión de calor, non serve para este tipo de fachadas ventiladas de xunta aberta, posto que estes coeficientes representan condicións de estado estacionario e admiten fluxo de calor unidireccional. Este sistema construtivo está fora do sistema DB e polo tanto o Código Técnico da Edificación en España non contempla estas fachadas.

Existen algúns estudos experimentais do comportamento térmico e fluído-dinámico destas fachadas e incluso modelos matemáticos realizados coa aplicación de cálculo de elementos finitos Fluent que están por comprobar.



Imaxe 14. Detalle construtivo 4 (foto da autora). Maqueta da sección construtiva dunha fachada ventilada exposta no departamento de construción da ETSAC, realizada polos alumnos Aida Janeiro Rama, Beatriz Pérez González e Paula Ramos Martínez.

⁹C. San Juan, "Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta" (tesis doctoral, Universidad de Oviedo, Madrid, 2011),11-12.

7 Estudos experimentais consultados da convección natural nas fachadas ventiladas

Os estudos experimentais consultados na tese de San Juan (2011)¹⁰ respecto destas fachadas baséanse nunha serie de técnicas utilizadas por varios autores para elaborar medidas de velocidade do aire en fachadas ventiladas de edificios reais ou prototipos a escala real, polo que fago aquí un resumo deles.

7.1 Medidas de diferenza de presión.

Segundo Tropea (2007)¹¹ o método máis económico para tomar medidas de velocidade en fluxos estacionarios e con velocidades medias-altas é o fundamento nas diferenzas de presión combinadas coa ecuación de Bernoulli. Que se basea nunha técnica que emprega sondas e sensores económicos e fáciles de fabricar, que poden axustar o rango do transdutor ás propiedades do fluído para medir. Pero hai que ter en conta que é unha medida de velocidade intrusiva e puntual.

Por outra banda Saelens(2002)¹² co tubo Pitot (ver imaxe 15), que é un elemento de medida que proporciona o cálculo da velocidade dun fluído a partir da presión total, tamén chamada presión de estancamento ou presión de remanso, que é o total de sumar a presión estática e a presión dinámica, isto faio Saelens para saber o fluxo de aire da cavidade ventilada dunha fachada activa, facendo medidas da diferenza de presión na zona de ventilación inferior e superior.

Estas medidas realizadas no Laboratorio de Building Physics da Universidade Católica de Lovaina, practícanse con ventilación mecánica e con ventilación natural. Para Saelens esta técnica é fiable cando a fachada é activa, pero na súa tese de 20026 admite que a medida de velocidade mediante diferenzas de presión é fiable con ventilación mecánica, pero con ventilación natural a resistencia do orificio dos sensores é tan alta en comparación coas forzas motrices do fluxo que se producen uns erros moi grandes nas medidas.

Por tanto esta técnica ten as seguintes características:

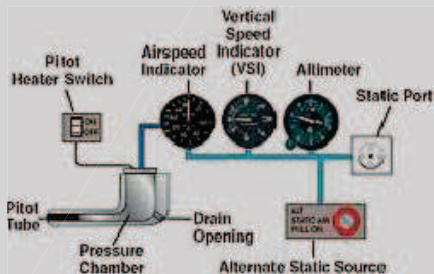
- É unha medida puntual de velocidade e débense coñecer as dirección do fluxo para non levar a grandes erros.
- Sistema de medida intrusivo. As perdas de presión do interior dos sensores polo xeral non permiten facer medidas en fluxos con baixa velocidade de fluído como pasa na convección natural en fachadas ventiladas.
- O tempo de resposta é alto, polo que non se poden facer medidas en situación tansitorias ou turbulentas.
- Normalmente necesítase sistemas de visualización de fluxo.

7.2 Anemometría de fio quente (HW).

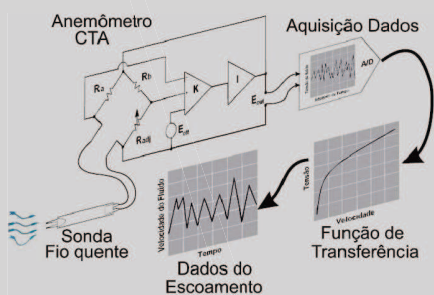
Esta técnica mide a velocidade dun fluído detectando os cambios na calor transmitida desde un pequeno sensor, o fio quente, á corrente fluída. A virtude desta técnica é que se poden realizar medicións de velocidade e de temperatura ao longo do tempo en fluxos transitorios e turbulentos, xa que a baixa inercia do fio quente confírelle un tempo de resposta moi baixo.

O fio é quentado electricamente de maneira que a velocidade do fluído adquirese a partir da corrente ou voltaxe necesaria para manter o fio a temperatura constante. A perda de calor do fio relaciónase coa velocidade segundo a lei de King (White, 1990).

O equipo pode traballar con intensidade constante, de maneira que a resistencia é unha medida da velocidade, con resistencia do fio constante, de maneira que a intensidade é a medida da velocidade, ou con voltaxe do fio constante. De todos os xeitos o equipo normalmente ten un linealizador para xerar os datos de velocidade nunha forma conveniente, e ten que calibrarse antes de ser utilizado. Vemos os pasos desta medición na imaxe 16.



Imaxe 15. Sistema pitot (wikipedia). Diagrama do sistema pitot estático que inclúe o tubo pitot, os instrumentos pitot estáticos e as tomas de presión estática e dinámica.



Imaxe 16. Medición da velocidade de fluídos (ebah). Esta é a cadea organizada para a determinación da velocidade de fluídos mediante o emprego da anemometría de fio quente.

¹⁰C. San Juan, "Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta" (tesis doctoral, Universidad de Oviedo, Madrid, 2011).

¹¹C. Tropea, A. Yarin e J.F. Foss, "Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics," Springer, Berlin (2007) 309-341.

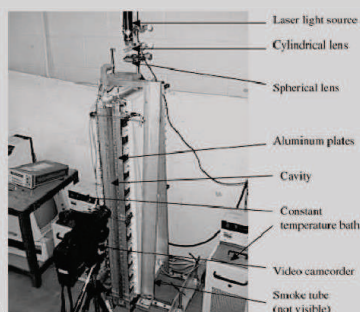
¹²D. Saelens, "Energy Performance Assessment of Single Storey Multiple-Skin Facades" (thesis, Laboratory for Building Physics, Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Belgium, 2002).

Do mesmo xeito que pasa coas medidas da diferenza de presión, os anemómetros de fío quente son medidas intrusivas, por iso a elección do sensor debe depender das condicións de fluxo (unidimensional, bidimensional ou tridimensional) como da posibilidade física de colocación dos sensores. A virtude destes sensores fronte ás medidas de diferenza de presión é que poden medir velocidades baixas de fluído, e por iso pódense utilizar en medidas da velocidade do aire en cavidades ventiladas por convección natural. Ademais, a baixa inercia dos fíos quentes asígnalles un tempo de resposta moi baixo, o que tamén posibilita medidas en fluxos transitorios.

Polo tanto esta técnica ten as seguintes características :

- Medida puntual de velocidade.
- Necesidade de coñecer a dirección do fluxo.
- Sistema intrusivo.
- Tempo de resposta moi baixo pola pouca inercia do fío quente, co que se poden facer medidas en situación transitorias ou turbulentas.
- Pódense medir velocidades baixas de fluído, por tanto pódense utilizar en medidas de velocidade de cavidades ventiladas por convección natural.
- Normalmente necesítanse sistemas de visualización de fluxo.

7.3 Gas traza e visualización do fume.



Imaxe 17. Sistema gas traza (San Juan). Dispositivo experimental de visualización de fluxo nunha cavidade ventilada.

As técnicas como a de concentración constante, a de emisión constante e o método de dilución do trazador dan a posibilidade de definir o fluxo de aire en cavidades ventiladas mecánica e naturalmente, sen interferir no fluxo (ver imaxe 17). O inconveniente desta técnica é non dar a posibilidade de medir velocidades, senón fluxos en condicións estacionarias.

Corgnati (2007)¹³, desenvolve a monitorización dun muro trombe en condicións reais de uso. Analizando aquí diferentes maneiras de funcionamento da fachada:

Con e sen cortinas venecianas.

Con ventilación mecánica.

Con ventilación natural con filtro e sen filtro na entrada da cavidade ventilada.

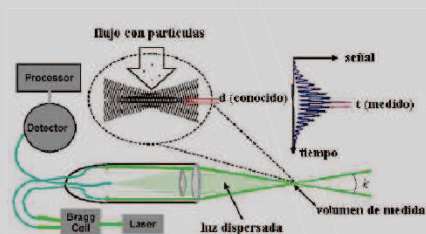
Para isto instaláron un anemómetro de fío quente na entrada da cavidade ventilada e para completar esta medida puntual da velocidade e así vinculala co fluxo de ventilación, fanse campañas de medidas simultáneas de velocidade (co anemómetro) e de fluxo (con gas traza). Estas medidas simultáneas efectúanse para cada unha das tres maneiras de funcionamento da fachada. No caso da ventilación mecánica, aplicáronse diferentes caudais de ventilación e as medidas de fluxo fóronse asociando coas correspondentes medidas de velocidade puntuais, ata lograr unha especie de curva de calibrado do fluxo en función da velocidade medida, o cal lles proporciona ter unha información continua do fluxo a través dunha soa medida de velocidade.

Polo tanto esta técnica ten as seguinte características:

- É un sistema de visualización de fluxo.
- Con algunhas técnicas pódense medir fluxos pero no serve para medir velocidades.
- Necesítase a xeración de fume e de sistemas de adquisición de imaxes.
- Esta técnica pode ser realizada en instalacións reais porque non se necesitan condicións de laboratorio.

7.4 Anemometría Láser Doppler (LDA).

Nesta técnica, máis coñecida como LDA ou LDV, dous feixes orixinarios dun único láser crúzanse para formar o volume de medida. Cando as partículas arrastradas polo fluxo traspasan o volume de medida, a luz dispersada por aquelas ten unha variación na frecuencia respecto da luz orixinal por defecto Doppler. O valor desta frecuencia é idéntico á velocidade da partícula dividida entre o espazado entre franxas de interferencia que é un valor coñecido. A luz espaxada é recollida polo fotodetector ou fotormultiplicador que transforma a luz en sinal eléctrico e fai posible a medida da súa frecuencia (ver imaxe 18).



Imaxe 18. Anemometría Láser Doppler (San Juan). Esquema básico de funcionamento da técnica de anemometría Láser Doppler (LDV).

¹³S.P. Corgnati, P. Perino e V. Serra, "Experimental assessment of the performance of an active transparent façade during actual operating conditions," Solar Energy 81 N° 8 (2007) 993-1013.

¹⁴S.S. Hsieh e C.Y. Wang, "Flow Structure and Temperature Measurements in a 3-D Vertical Free Convective Enclosure at High Rayleigh Numbers," Int. J. Heat Mass Transfer 40 N° 6 (1997) 1467-1480.

¹⁵Y.S. Tian e T.G. Kariyanis, "Low turbulence natural convection in an air filled square cavity Part I: the thermal and fluid flow fields," Int. J. Heat Mass Transfer 43 (2000) 876-884.

Hsieh e Wang (1997)¹⁴ investigaron a convección natural dentro dunha cavidade vertical pechada con condicións asimétricas de temperatura. Nesta investigación realizaron medidas de velocidade no plano central da cavidade e cun sistema de elevación do sistema LDV elaboraron medidas a diferentes alturas, para logo facer a reconstrución do fluxo ao longo de todo o volume de medida.

Tian and Kariyanis (2000)¹⁵ fabricaron un sistema experimental que mantén as paredes isotermas debido a un sistema de refrixeración por auga, onde tamén empregan unha estrutura de desprazamento para medir en diferentes zonas da cavidade.

7.5 Velocimetría de imaxes de partículas (PIV).

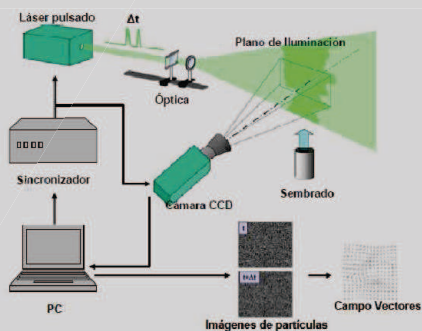
Esta é unha técnica de medida cuantitativa experimental, xa que a súa intención é conseguir o campo de velocidades dun fluído empregando partículas trazadoras. O sistema fundáméntase na medida da velocidade das partículas trazadoras transportadas polo fluído por medio de imaxes. Para que isto suceda incorpóranse partículas trazadoras ao fluxo, que ten que ser iluminado nun plano durante un intervalo curto de tempo, é entón cando as partículas reflicten a luz e a súa imaxe é rexistrada. O desprazamento das partículas calcúlase coa análise das mesmas. Os rexistros das imaxes das partículas en dous momentos, separados un intervalo de tempo coñecido, permiten definir o desprazamento das partículas. Por tanto, a velocidade instantánea dun fluído é unha medida de desprazamento das partículas trazadoras iluminadas pola lámina de luz (ver imaxe 19).

A parte destes estudos hai unhas investigacións elementais de convección natural no interior de canles verticais, que teñen moito parecido co problema das fachadas ventiladas, que baixo a acción da radiación solar pode gardar semellanza cunha canle con condicións de temperatura asimétricas. Por exemplo Salom (1999)¹⁶, na súa tese doutoral propón unha unidade experimental composta de dúas superficies isotermas xerando unha canle vertical. A temperatura de cada unha das superficies isotermas podía ser regulada independentemente. Para proporcionar acceso visual ao experimento, os laterais da canle estaban deseñados con material transparente e ademais as medidas do fluxo facíanse en condicións de convección natural.

En canto á Anemometría Láser Doppler (LDA) e a Velocimetría de Imaxes de Partículas (PIV) posúen unha serie de características comúns:

- As dúas son técnicas de medida de velocidade non intrusiva.
- As dúas son técnicas de medida indirecta de velocidade, posto que se mide a velocidade dun fluído indirectamente a partir da medida da velocidade das partículas trazadoras inseridas nese fluído.
- Necesítase empregar partículas trazadoras, fonte de iluminación e sistemas de adquisición de imaxes. Por tanto é unha técnica de medida de laboratorio posto ás medidas que se deben seguir de seguridade, de iluminación, ademais do tamaño das rexións de análises.
- Estas dúas técnicas teñen unha virtude fronte ás técnicas puntuais de medida porque estas déixannos conseguir o campo de velocidades na rexión rexistrada pola cámara, o que fai posible a detección de estruturas espaciais e a súa evolución temporal en fluxos tanto estables como inestables. É por esta razón que é propia para estudar as estruturas de fluxo coherentes típicas dos fluxos turbulentos.

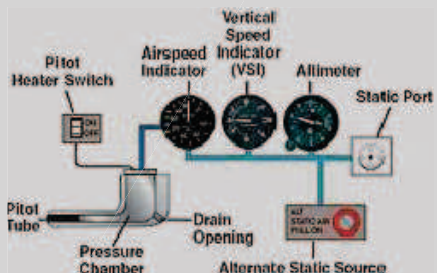
¹⁶J. Salom, "Numerical simulation of convection phenomena based on domain decomposition technique, Experimental validation" (Ph. D. Thesis, Univesitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1999).



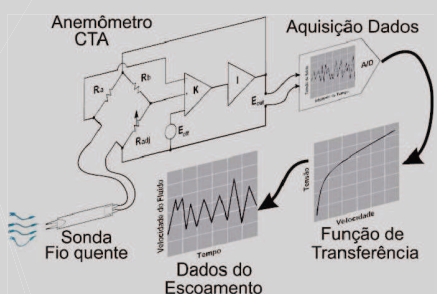
Imaxe 19. Velocimetría de imaxes de partículas (PIV) (San Juan). Esquema básico de funcionamento da técnica de velocimetría de imaxes de partículas (PIV).

7.6 Tabla resumen e comparativa das diferentes técnicas.

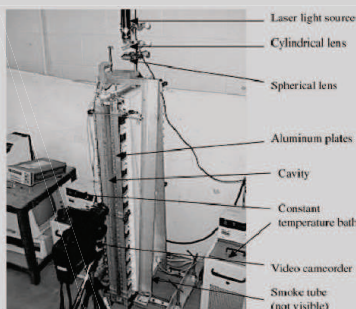
En esta tabla de realización propia pretendo ver as fortalezas e as debilidades de cada unha das técnicas que acabamos de explicar.



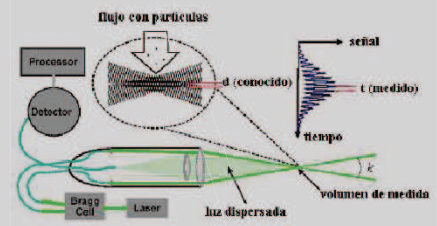
Imaxe 15. Medidas de diferenza de presión.



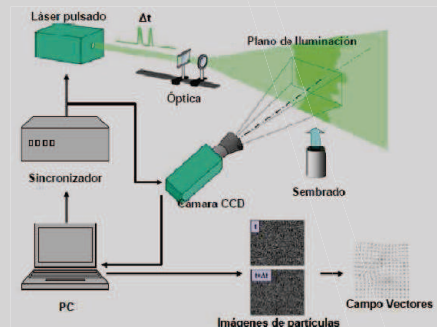
Imaxe 16. Anemometría de fio quente.



Imaxe 17. Gas traza e visualización do fume.



Imaxe 18. Anemometría Láser Doppler (LDA).



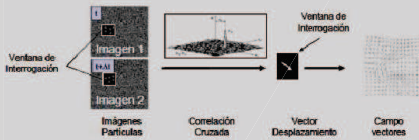
Imaxe 19. Velocimetría de imaxes de partículas (PIV).

	Fortalezas	Debilidades
Medidas de diferenza de presión	<ul style="list-style-type: none"> -A sinxeleza. -A economía. 	<ul style="list-style-type: none"> -É unha medida puntual de velocidade e débense coñecer as dirección do fluxo para non levar a grandes erros. -Sistema de medida intrusivo. As perdas de presión do interior dos sensores polo xeral non permiten facer medidas en fluxos con baixa velocidade de fluído como pasa na convección natural en fachadas ventiladas. -Normalmente necesítase sistemas de visualización de fluxo. -O tempo de resposta é alto, polo que non se poden facer medidas en situación transitorias ou turbulentas.
Anemometría de fio quente (HW)	<ul style="list-style-type: none"> -Tempo de resposta moi baixo pola pouca inercia do fio quente, co que se poden facer medidas en situación transitorias ou turbulentas. -Pódense medir velocidades baixas de fluído, por tanto pódense utilizar en medidas de velocidade de cavidades ventiladas por convección natural. 	<ul style="list-style-type: none"> -Medida puntual de velocidade. Necesidade de coñecer a dirección do fluxo. -Sistema intrusivo. -Normalmente necesítase sistemas de visualización de fluxo.
Gas traza e visualización do fume	<ul style="list-style-type: none"> -É un sistema de visualización de fluxo. -Esta técnica pode ser realizada en instalacións reais porque non se necesitan condicións de laboratorio. 	<ul style="list-style-type: none"> -Con algunhas técnicas pódense medir fluxos pero non serve para medir velocidades. -Necesítase a xeración de fume e de sistemas de adquisición de imaxes.
Anemometría Láser Doppler (LDA)	<ul style="list-style-type: none"> -As dúas son técnicas de medida de velocidade non intrusiva. -As dúas son técnicas de medida indirecta de velocidade, posto que se mide a velocidade dun fluído indirectamente a partir da medida da velocidade das partículas trazadoras inseridas nese fluído. -Unha virtude fronte ás técnicas puntuais de medida é que estas deixánnos conseguir o campo de velocidades na rexión rexistrada pola cámara, o que fai posible a detección de estruturas espaciais e a súa evolución temporal en fluxos tanto estables como inestables. Por eso son as propias para estruturas de fluxo coherentes típicas dos fluxos turbulentos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Con algunhas técnicas pódense medir fluxos pero non serve para medir velocidades. -Necesítase a xeración de fume e de sistemas de adquisición de imaxes.
Velocimetría de imaxes de partículas (PIV)		

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

8 Estudio experimental consultado de fachadas ventiladas de xunta aberta

8.1 Análise fluído dinámico mediante velocimetría de imaxes de partículas PIV.



Imaxe 20. Técnica de autocorrelación espacial aplicada a PIV (San Juan). Esta técnica consiste en elixir unha partícula determinada da primeira imaxe, e cada partícula da segunda imaxe é unha posible candidata a formar un par de imaxes e por tanto un posible desplazamento da partícula, esto reflexa o histograma de desplazamento donde todos os picos teñen a mesma amplitude cada vez que dúas partículas coinciden e finalmente obtense un pico de desplazamento dominante.

O comportamento fluído-dinámico das fachadas ventiladas de xunta aberta é moi complexo, por iso con este estudo consultado na tese de San Juan (2011)¹⁷ e que eu resumo aquí, téntase coñecer a estrutura do fluxo.

Esta técnica de velocimetría de partículas (PV) orixínase coa composición das tecnoloxías de procesada dixital de imaxes desenvolvidas ultimamente (fotogrametría e videogrametrías) e a configuración tradicional de visualización de fluxo baseadas na adición de partículas. A mestura destas dúas técnicas dá a posibilidade de conseguir á vez información cualitativa e cuantitativa da distribución espacial e temporal do fluxo.

A velocimetría de partículas ten diferentes procedementos, onde todos teñen en común o agregar partículas trazadoras ao fluído pero diferéncianse polo modo de imaxe. Este modo de imaxe depende da densidade da fonte, da densidade de imaxe e do tipo de iluminación. A densidade da fonte determínase como o número prometio de partículas da rexión de análise, e a densidade de imaxe outórgase ao número prometio de imaxes de partículas na xanela de análise. Con todos estes criterios definidos Westerweel (1993)¹⁸ (ver imaxe 20) clasifica as técnicas de velocimetría de partículas do seguinte modo:

- Velocimetría de seguimento de partículas (PTV): esta técnica utilízase para contemplar imaxes realizadas sobre partículas individuais. O que se fai é que se rastrea cada partícula individualmente, co cal as velocidades calcúlanse en posicións aleatorias do fluxo. Deste xeito as velocidades nos demais puntos do fluxo hanse de obter por interpolación, polo que só se pode realizar se as escalas de fluído son máis pequenas que a distancia entre as partículas.
- Velocimetría de imaxes de partículas (PIV): con este modelo de medidas, cada cela de análise ten un número suficiente de imaxes de partículas para definir a velocidade media.
- Velocimetría de punto láser (LSV): a densidade da fonte é tan alta que as imaxes de partículas se superpoñen e non se consegue identificar. Como son iluminadas cunha fonte de luz láser prodúcese un patrón de moteado como consecuencia das interferencias da luz dispersada polas partículas. Estes patróns de moteado son rexistrados en imaxes e son procesados do mesmo xeito que na técnica PIV para calcular os desprazamentos.
- Velocimetría de manchas por láser (PSV): as características son as mesmas que o modo de PTV, pero neste caso os patróns das imaxes son raias e non moteado de puntos.

A base de funcionamento da técnica PIV é a medida de desprazamento das pequenas partículas trazadoras que son trasladadas polo fluído durante un intervalo pequeno de tempo. Estas partículas trazadoras teñen que ser o suficientemente pequenas para seguir ao fluxo e non modificar nin as características nin a súa traxectoria. Deste xeito as partículas en suspensión son iluminadas cunha lámina de luz xerada por un láser de luz pulsada e por tanto a luz reflectida polas partículas rexístrase en imaxes de partículas cunha cámara dixital (CCD). Como consecuencia disto o desprazamento das partículas calcúlase coa análise das imaxes rexistradas. Estes rexistros das imaxes de partículas fanse en dous momentos separados un espazo de tempo coñecido proporcionando así o desprazamento das partículas.

As singularidades desta técnica son:

- É unha técnica non intrusiva de medida de velocidade.
- É unha técnica indirecta de medida de velocidade, xa que mide a velocidade dun fluído indirectamente coa medida da velocidade das partículas trazadoras incorporadas nese fluído.
- É unha técnica de medida do campo de velocidades, posto que nos proporciona o campo de velocidades na zona rexistrada pola cámara dixital. Estas medidas realizadas con PIV son de gran utilidade na detección de estruturas de fluxo coherente (típicos de fluxos turbulentos) e a súa evolución temporal.
- Esta técnica necesita acceso visual ao fluído desde dous planos, é dicir, o plano de iluminación láser e o sistema de adquisición das imaxes da partículas.

¹⁷C. San Juan, "Análisis del comportamiento térmico y fluído-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta" (tesis doctoral, Universidad de Oviedo, Madrid, 2011).

¹⁸J. Westerweel, "Digital Particle Image Velocimetry, Theory and Application" (PhD thesis, Delft University, 1993).

9 Reflexións do comportamento térmico e do comportamento fluído dinámico.

Respecto ao comportamento térmico, os valores de temperatura das laxes e da parede interior, que son as caras en contacto coa cavidade, son as que conforman este comportamento.

Como podemos ver na imaxe 21 a temperatura das plaquetas nunha fachada ventilada de xuntas abertas ten menor temperatura que por exemplo unha fachada convencional coa cavidade selada.

Ademais disto hai que ter en conta que o aire na cavidade das fachadas ventiladas de xunta aberta ten unha temperatura inferior á correspondente ás dúas paredes da cavidade, con todo nas fachadas convencionais, a temperatura do aire é a media entre a temperatura das dúas paredes da cavidade.

Que o aire da cavidade entre e salga nas fachadas ventiladas xera a evacuación de calor cara ao exterior no canto de evacuar cara o interior do edificio.

Polo que todo isto podémolo deducir en que tendo as mesmas condicións de radiación e temperatura, as temperaturas nunha fachada ventilada son inferiores ás temperaturas nunha fachada convencional.

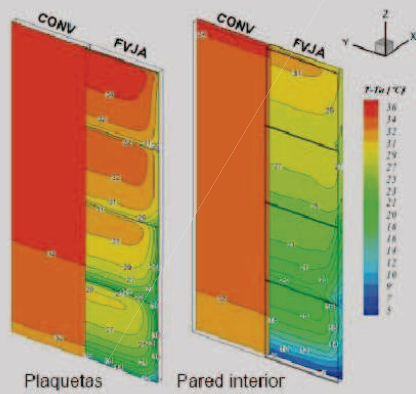
E como nos confirma San Juan (2011)¹⁹ na súa tese, o fluxo de calor transferida ao interior do edificio tamén é maior no caso dunha fachada con cavidade pechada, a pesar de que na cavidade pechada o fluxo de calor é uniforme ao longo da altura da fachada, mentres que na fachada ventilada o fluxo de calor aumenta a medida que ascende a temperatura do aire na cavidade.

Respecto ao revestimento exterior, as plaquetas absorben a radiación solar e desta unha parte disípase á atmosfera e outra parte á cavidade. Por tanto como vimos anteriormente a fachada convencional de cavidade selada está máis quente que a fachada ventilada xa que a ventilada disipa máis calor da superficie externa ao exterior que a convencional. Do mesmo xeito na cara interior das plaquetas a transmisión de calor á cavidade é menor nas fachadas ventiladas. Agora ben, o fluxo de calor que vai ao interior do edificio é menor nas fachadas ventiladas.

Como resumo, na fachada de cavidade selada a calor que se disipa á cavidade transmítese á parede interior e por tanto ao interior do edificio, pero nas fachadas ventiladas a maior parte de calor que as plaquetas transmiten ao interior da cavidade absórbese polo aire de ventilación e transmítese á atmosfera.

Cando falamos do comportamento fluído dinámico se nos fixamos nunha fachada convencional de cavidade selada podemos ver como o aire sobe pola parede quente, de maneira que tamén axuda a disipar calor da mesma e logo baixa pola parede fría á que cede a calor absorbida no ascenso. Pero cando falamos de fachadas ventiladas a radiación solar sobe a temperatura das plaquetas e por convección natural prodúcese un fluxo de aire ascendente en todo o ancho da cavidade que como está a menor temperatura que as paredes (aire exterior) axuda a disipar calor de ambos os lados.

A velocidade en referencia á altura nas fachadas convencionais son constantes en toda a altura da cavidade dividíndose nunha parte ascendente e outra descendente, é dicir, unha estrutura de bucle convectivo. Con todo nas fachadas ventiladas as velocidades varían segundo a altura, como consecuencia das discontinuidades de masa que se producen pola existencia de xuntas abertas.



Imaxe 21. Contornos de temperatura en diferentes planos da fachada (San Juan). Comparativa entre fachada ventilada de xunta aberta (dereita) e fachada convencional (esquerda). Verán: T. Ext.:30°C, T. Int.:24°C e G:400W/m². O aire que entra polas xuntas abertas de menor temperatura xera un efecto de ventilación que contribúe a disipar parte da calor das paredes, tanto a calor das laxes exteriores que están quentes debido á radiación solar incidente, como a calor da parede interior que está quente debido ao intercambio radiativo desde a parede externa. O fluxo a través das xuntas abertas móstrase nos contornos de temperatura das laxes, que están máis frías nas zonas das xuntas.

10 Conclusións.

En primeiro lugar, en referencia aos estudos experimentais consultados podemos dicir que as medidas puntuais de velocidade como a anemometría de fío quente son técnicas moi precisas, aínda que se necesita de técnicas adicionais de visualización. Pero estas medidas da presión non serven para medir a velocidade en condicións de convección natural polas baixas velocidades de fluído.

Doutra banda as técnicas LDA e PIV son unha boa opción para as estruturas de fluxo no interior de cavidades, xa que se poden medir campos de velocidades de modo non intrusivo.

Pero cando nos encontramos cos requirimentos constructivos como o lume, donde se necesita unha determinada compartimentación, ou a cámara equipotencial que tamén precisa unha compartimentación, estas sofisticadas técnicas non son efectivas, de modo que estes estudos tan minuciosos e de tanta complexidade, apártanse das solucións construtivas reais, xa que se enfoca nunhas análises concretas e parciais, que están lonxe da realidade construtiva.

En segundo lugar, falando de eficiencia enerxética, a efectividade destas fachadas depende da cantidade de enerxía absorbida polo caudal de ventilación conforme ascende pola cavidade, á súa vez esta enerxía térmica depende da radiación solar absorbida pola fachada e da temperatura exterior. De modo que canto maior sexa a radiación solar absorbida maior é o fluxo de ventilación inducido no interior da cavidade, pero tamén maior é a cantidade de calor que se disipa. Ademais disto canto menor sexa a temperatura exterior, maior será o potencial do fluxo de ventilación para eliminar a enerxía das paredes da fachada, sobre todo nas plezas exteriores.

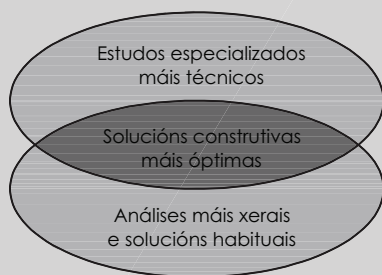
Na actualidade debemos ter en conta o gran cambio que se produce respecto do illamento, xa que como vimos nesta análise empregábase un illamento de 3cm. que fronte aos illamentos da actualidade que poden superar os 12cm. (en A Coruña 12cm en cerramentos verticais), ademais existe o estándar enerxético como Passivhaus que busca incrementar o illamento e a estanquidade absoluta. Neste escenario de cerramentos de estanquidade absoluta e baixa transmitancia térmica, minimízase a transcendencia do comportamento termodinámico da cámara destas fachadas.

O terceiro punto que non debemos esquecer nestas fachadas é a auga, xa que en inglés son coñecidas como pantallas de auga "rain-screen", quixemos paramos a entender a problemática existente cando se xunta a presenza de vento coa auga (como nas galerías Coruñesas¹⁹), xa que é un tema que tamén evolucionou ao longo do tempo debido a que antes o que se facía fronte as correntes de vento e a diferenza de presión era eliminar todas as aberturas, e sen embargo agora o que se intenta é conseguir eliminar o diferencial de presión mediante a abertura, para isto hai que coñecer todos os requirimentos que esixe unha parede de presión equilibrada.

Con frecuencia esquécese que o obxectivo principal das fachadas ventiladas ou pantalla de choiva (rain-screen) é a protección fronte a auga, ademais de isto debe cumprirse as prestacións innerentes a un cerramento (protección, illamento, etc.).

Todo isto fainos reflexionar sobre a importancia da análise construtiva transversal como criterio fundamental da investigación básica para poder alcanzar a transferencia tecnolóxica necesaria na construción. E recordando que a arquitectura ten tamén unha compoñente estética que desvirtúa os desenvollos técnicos (recordar o caso das anclaxes vistas nas fachadas ventiladas).

¹⁹Fernández Madrid, J., La galería en Galicia como elemento de la arquitectura del agua, Tesis Doctoral, Universidad de Coruña, Coruña, 1989.
O autor propón a interpretación da galería Coruñesa como protección fronte os fortes temporales de choiva e vento do sur que afectan a Coruña.



Imaxe 22. Conclusión (debuxo da autora). Esquema resume realizado pola autora como conclusión do traballo.

Cámara equipotencial: según wikipedia unha superficie equipotencial é o lugar xeométrico dos puntos dun campo escalar nos cales o "potencial de campo" ou valor numérico da función que representa o campo, é constante (neste caso aplicado a presión do vento). As superficies equipotenciais poden calcularse empregando a ecuación de Poisson.

CCD: (charge-coupled device) dispositivo de carga acoplada, según wikipedia é o sensor con diminutas células fotoeléctricas que rexistran a imaxe, a capacidade de resolución ou detalle da imaxe depende do número de células fotoeléctricas do CCD.

HW: (hot wire) fío quente.

LDA: (laser Doppler anemometry) amemometría de láser Doppler.

LDV: (laser Doppler velocimetry) velocimetría de láser Doppler.

LSV: (laser speckle velocimetry) velocimetría de punto láser.

Passivhaus: según wikipedia é o estándar de construtivo que se diferencia doutros conceptos xenéricos pola súa capacidade para reducir a demanda para un espazo e o consumo primario de enerxía non renovable, por esta razón pode considerarse ao mesmo tempo unha avanzada especificación de rendemento enerxético e un concepto integrado de deseño de baixo consumo enerxético. O confort térmico que logra débese no súa maior parte ao uso das seguintes medidas:

-Niveis adecuados de illamento, con pontes térmicas mínimos.

-Ganancias solares pasivas e fontes de calor internas.

-Excelente nivel de estanquidade.

-Óptima calidade do aire interior grazas a un sistema altamente eficaz de ventilación mecánica con recuperación de calor para toda a casa.

Os edificios que cumpren o estándar passivhaus englobanse na denominación de edificios NZEB (Near Zero Energy Building) en español EECN (Edificios de Enerxía Casi Nula) que se determina de acordo a Directiva Europea 2010/31/UE.

PIV: (particle image velocimetry) velocimetría de imaxes de partículas.

PSV: (particle spots velocimetry) velocimetría de manchas por láser.

PTV: (particle tracking velocimetry) velocimetría de seguimento de partículas.

Transferencia radioactiva de calor: según wikipedia é o proceso de intercambio de enerxía mediado por radiación electromagnética, de modo que non require para a transferencia ningunha forma de materia.

Transferencia de calor por convección: según wikipedia é o proceso polo cal se establece un fluxo de calor dende un corpo ou rexión de maior temperatura cara a outro corpo ou rexión de menor temperatura a través dun fluído, xa sexa líquido ou gas. Un mecanismo adicional de transferencia de calor pode aparecer debido ao movemento do fluído.

12 Bibliografía e outras referencias

Bibliografía:

Libros:

Brookes, A. J. e M. Meijs. 2008. *Cladding of Buildings*. Taylor & Francis, Trowbridge, Wiltshire.

Tropea, C., A. Yarin e J.F. Foss. 2007. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer, Berlin 309-341.

Artigos:

Corgnati, S.P., P. Perino e V. Serra. 2007. "Experimental assessment of the performance of an active transparent façade during actual operating conditions". *Solar Energy* 81 N° 8. 993-1013.

De los Ángeles, M., J. Gutiérrez, E. Gil, A. Gil, V. Galván. 2011. "Recomendaciones de diseño y construcción para mejorar la impermeabilidad pantalla de lluvia en las paredes construidas con revestimiento de piedra natural". *Construcción y Materiales de Construcción* 25. 1753-1761.

Hsieh, S.S. e C. Y. Wang. 1997. "Flow Structure and Temperature Measurements in a 3-D Vertical Free Convective Enclosure at High Rayleigh Numbers". *Int. J. Heat Mass Transfer* 40 N° 6. 1467-1480.

Lucchini, A.. 2000. "Le pareti ventilate; metodologia di progettazione e messa in opera di material e componente". Milano, edizione il Sole 24 Ore, settembre.

Tian, Y.S. e T. G. Kariyanis. 2000. "Low turbulence natural convection in an air filled square cavity Part I: the thermal and fluid flow fields". *Int. J. Heat Mass Transfer* 43. 876-884.

Zarzalejo, L.F., F.M. Téllez, E. Palomo, M. R. Heras, 1995. "Creation of typical meteorological years (TMY) for Southern Spanish cities". *International Symposium Passive Cooling of Building*. Athens, Greece.

Tesis:

Fernández Madrid, J.. 1989. *La galería en Galicia como elemento de la arquitectura del agua*. Tesis Doctoral. Universidad de Coruña.

Giancola, E.. 2010. *El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Saelens, D.. 2002. *Energy Performance Assessment of Single Storey Multiple-Skin Facades*. Thesis, Laboratory for Building Physics, Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Belgium.

Salom, J.. 1999. *Numerical simulation of convection phenomena based on domain decomposition technique, Experimental validation*. Ph. D. Thesis, Univesitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

San Juan, C.. 2011. *Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Madrid.

Westerweel, J.. 1993. *Digital Particle Image Velocimetry, Theory and Application*. PhD thesis, Delft University.

Outras referencias:

Imaxe 1. Debuxo realizado pola autora.

Imaxe 2. Geotecnia, "Historias de la geotecnia," la ingeniería geotécnica antes del siglo XVIII.

<http://geotecnia-sor.blogspot.com.es/2010/12/historia-de-la-geotecnia-04-la.html> (consultada o 15 de setembro de 2015).

Imaxe 3. Imaxe citada por Antonio Raya de Blas no artigo "El pegado elástico en fachadas trasventiladas de piedra" de Antonio Raya de Blas, Cristóbal Crespo González, Santiago Sánchez Iglesias e Enrique Antelo Tudela do Boletín Académico Revista de investigación y arquitectura contemporánea. Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidade da Coruña N°2 (2012) 36-45.

Imaxe 4. Debuxo realizado pola autora.

Imaxe 5. Debuxo do libro Cladding of Buildings de Brookes, Alan J. e Maarten Meijis. 2008. Taylor & Francis, Trowbridge, Wiltshire. Páx. 6.

Imaxe 6. Debuxo do libro Cladding of Buildings de Brookes, Alan J. e Maarten Meijis. 2008. Taylor & Francis, Trowbridge, Wiltshire. Páx. 7.

Imaxe 7. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 209.

Imaxe 8. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 218.

Imaxe 9. Foto da autora da maqueta da sección construtiva das vivendas de Astana exposta no departamento de construción da ETSAC, realizada polos alumnos Iago Otero Regueira e Miriam Nuñez Guerrero.

Imaxe 10. Foto da autora da maqueta da sección construtiva dunha fachada ventilada exposta no departamento de construción de ETSAC, realizada polos alumnos Isabel Rendo Rivero e Santiago Tarrío Goy.

Imaxe 11. Foto da autora da maqueta do triedro de cuberta dunha fachada ventilada de pedra exposta no departamento de construción da ETSAC.

Imaxe 12. Debuxo da tese de Giancola Emanuela. 2010. El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas. Universidad Politécnica de Madrid. Páx. 94.

Imaxe 13. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 12.

Imaxe 14. Foto da autora da maqueta da sección construtiva dunha fachada ventilada exposta no departamento de construción da ETSAC, realizada polos alumnos Aida Janeiro Rama, Beatriz Pérez González e Paula Ramos Martínez.

Imaxe 15. Debuxo da Wikipedia, "Sistema pitot-estática".
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_pitot-est%C3%A1tica (consultado o 23 de setembro de 2015).

Imaxe 16. Debuxo de eBah, "Medidas de propiedades termofísicas"
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABvVoAH/medida-propiedades-termofisicas> (consultado o 23 de setembro de 2015).

Imaxe 17. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 31.

Imaxe 18. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 32.

Imaxe 19. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 34.

Imaxe 20. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 61.

Imaxe 21. Debuxo da tese de Cristina San Juan 2011. Análisis del comportamiento térmico y fluido-dinámico de las fachadas ventiladas de junta abierta. Universidad de Oviedo, Madrid. Páx. 211.

Imaxe 22. Debuxo realizado pola autora.

