

CARACTERIZACIÓN DE FACHADAS DE DOBLE PIEL, RESUELTAS MEDIANTE EL USO DE CHAPAS PERFORADAS

Doktorego programa / **Programa de doctorado:**

INGENIERIA MECANICA

Doktoregaiaren izen-abizenak / **Nombre y apellidos del doctorando:**

ARTURO ZAPICO LOPEZ

dirigida por el Dr. JESUS CUADRADO ROJO y la Dra. LEIRE GARMENDIA ARRIETA

2020

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer públicamente todo el apoyo recibido para la realización de mi trabajo de Tesis Doctoral, a mis directores de tesis, *D. Jesús Cuadro Rojo* y *D^a. Leire Garmendia Arrieta*, así como, a todo el grupo de investigación del que forman parte, por la confianza depositada en mí, durante todo este tiempo.

Como no podía ser de otra manera, una mención especial tiene que ser para tí *Jesús*, no sólo por la gran ayuda recibida durante todo este tiempo, y en este trabajo de investigación que ahora se ve finalizado, también por tu persistencia, que me ha hecho sacar el tiempo necesario para poder finalizarlo.

Eso sin contar con la ayuda que he recibido por vuestra parte (*Jesús, Eduardo y Ramón*), desde que nos conocimos, cuando llegué a Bilbao en aquel año de 1.999 para proseguir con mis estudios superiores de Ingeniero Industrial con especialidad en construcción.

Me quedaría corto enumerando los motivos de mi agradecimiento:

Vuestra ayuda para conseguir mi primer trabajo como Ingeniero Industrial en la empresa Saiatek.

Vuestra ayuda para que pudiera dar mis primeras clases como docente en el Departamento de ingeniería Mecánica de la UPV/EHU dentro de la especialidad de construcción.

Vuestra ayuda para poder dar clase en el C.N.A.M del Centro de Formación de Somorrostro.

Vuestra ayuda para poder comenzar en mi andadura investigadora con su inicio en la suficiencia investigadora

Y sobre todo, lo que más valoro, es vuestra amistad.

Por otra parte quiero agradecer también el apoyo recibido durante estos años de trabajo a todos mis compañeros del área de Mecánica de Fluidos del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo, y particularmente a la profesora *D^a. Katia María Argüelles Díaz*, por haber confiado en mí como docente en la Universidad de Oviedo.

También tengo que agradecer a los alumnos y alumnas *Elena, Laura y Borja* así como a mis compañeros de la Universidad que han colaborado en las diferentes actividades que he tenido que realizar en las instalaciones de la Universidad de Oviedo.

Por supuesto, no me puedo olvidar de mi mujer, *Marta*, y de mis dos hijos, *Pelayo y Paula*, por haber estado siempre a mi lado mostrándome todo su apoyo durante esta larga travesía.

Por último, deseo también expresar mi agradecimiento a las dos entidades que han participado Universidad del País Vasco y Universidad de Oviedo, y en ellas a los grupos de investigación del Gobierno Vasco IT1314-19 y de la UPV/EHU GIU19/029, así como a la financiación recibida de la UPV/EHU PPGA19/61.

También quiero agradecer la ayuda recibida por parte de las empresas IMAR, S.A y RIMG, por las muestras facilitadas para la realización de todos los ensayos realizados. Y por supuesto a mi actual empresa FERJOVI S.A. por la ayuda recibida para poder realizar este trabajo de investigación.

Sin todos ellos, esta tesis doctoral no hubiera sido posible.

INDICE

INDICE:

Capítulo 1 Introducción	1
1.1.- INTRODUCCION	3
1.2.- OBJETIVOS	6
1.3.- DESARROLLO DEL DOCUMENTO DE TESIS	9
Capítulo 2 Introducción	13
2.1.- INTRODUCCION	15
2.2.- MATERIALES PARA LA ENVOLVENTE DE LOS EDIFICIOS	16
2.3.- SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE LA ENVOLVENTE DE LOS EDIFICIOS	24
2.4.- EVOLUCION DE LA NORMATIVA SOBRE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO	29
2.5.- LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO: FACHADAS DE DOBLE PIEL	31
2.6.- EJEMPLOS DE ENVOLVENTE DE DOBLE PIEL	51
2.7.- CONCLUSIONES	53
Capítulo 3 Metodología de trabajo	55
3.1.- INTRODUCCION	57
3.1.1.- Estudio del estado del arte	59
3.1.2.- Identificación de los parámetros de estudio	60
3.1.3.- Modelización de la solución constructiva	62
3.1.4.- Campaña de ensayos	65
3.1.5.- Análisis de los modelos y ensayos realizados	66
Capítulo 4 Caracterización mecánica	69
4.1 INTRODUCCION	71
4.1.1.-Materiales utilizados	71
4.1.2.-Otras variables	74
4.2.- MODELIZACION	79
4.3.- MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	79

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

4.4.- SIMULACIONES REALIZADAS	88
4.4.1.- Primer análisis comparación entre una chapa sin perforar y una chapa con perforaciones	88
4.4.2.- Segundo análisis, comprobación del comportamiento de la chapa frente al viento	90
4.4.2.1.- Doblar sólo pestañas en los laterales de mayor longitud	93
4.4.2.2.- Doblar sólo pestañas en los laterales de mayor longitud con dos dobleces, la última hacia el exterior	101
4.4.2.3.- Doblar sólo pestañas en los laterales de mayor longitud con dos dobleces, la última hacia el interior	106
4.4.2.4.- Doblar las pestañas en todos los laterales, sólo un doblez	111
4.4.2.5.- Doblar pestañas en los laterales de mayor longitud en forma de “U”, es decir, 3 dobleces	116
4.5.- ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE MUESTRAS DE CHAPA PERFORADA Y SUS SIMULACIONES	122
4.5.1.- Procedimiento de aplicación de cargas	127
4.5.2.- Definición de las muestras ensayadas	128
4.5.3.- Análisis comparativo de los modelos FEM y las muestras ensayadas	131
4.6.- CONCLUSIONES	137
Capítulo 5 Caracterización fluido-dinámica	141
5.1.- INTRODUCCION	143
5.2.- DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS	143
5.2.1.- Túnel de viento	143
5.2.2.- Equipos de adquisición de datos	145
5.2.3.- Descripción de las muestras utilizadas	147
5.2.4.- Procedimiento de ensayos	152
5.2.5.- Discusión sobre las mediciones realizadas con la muestra unida articuladamente	156
5.2.6.- Discusión sobre las mediciones realizadas con la muestra unida rígida	174
5.2.7.- Resumen final de las variables analizadas	182
5.3.- CONCLUSIONES	185
Capítulo 6 Caracterización acústica	189
6.1.-INTRODUCCION	191
6.2.- CONSIDERACIONES PREVIAS	192

6.2.1.- Propagación del sonido. Aislamiento y absorción	194
6.2.2.- Principales fuentes de contaminación acústica	196
6.3.- MODELIZACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE SOUNDFLOW	199
6.4.- ANÁLISIS EXPERIMENTAL CON MUESTRAS DE CHAPA PERFORADA	208
6.5.- CONCLUSIONES CARACTERIZACION ACUSTICA	218
Capítulo 7 Caracterización térmica	221
7.1.- INTRODUCCION	223
7.1.1.- Demanda Energética y Consumo Energético	223
7.1.2.- Estrategias de reducción de demanda de calefacción	227
7.1.3.- Estrategias de reducción de demanda de refrigeración	228
7.1.4.- Protecciones solares	228
7.1.5.- Uso de piel de chapa perforada para protección solar. Definiciones	231
7.1.6.- Definición de los datos de partida y variables de estudio	236
7.1.7.- Metodología seguida y análisis de resultados	239
7.2.- CONCLUSIONES	251
Capítulo 8 Caracterización visual	255
8.1.- INTRODUCCION	257
8.2.- METODOLOGÍA SEGUIDA	257
8.3.- RESULTADOS Y DISCUSION	258
8.4.- CONCLUSIONES	262
Capítulo 9 Conclusiones y futuras líneas de investigación	265
9.1.-INTRODUCCION	267
9.2.- CONCLUSIONES	267
9.3.- FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION	271
Capítulo 10 Bibliografía	275
10.1.-REFERENCIAS	277

INDICE DE FIGURAS:

Capítulo 1 Introducción	1
Capítulo 2 Estado del arte	13
Figura 2.1. Envolverte del Museo Guggenheim icono ciudad de Bilbao	15
Figura 2.2. Envolverte de piedra Torre de Londres	16
Figura 2.3. Envolverte de adobe, rascacielos de Shibán, Yemen	16
Figura 2.4. Envolverte de ladrillo, 570 Lexington Av NY	17
Figura 2.5. Envolverte de fachada ventilada. Torre de cristal, Madrid	18
Figura 2.6. Envolverte de hormigón prefabricado, Centro de creación contemporánea. Córdoba.	18
Figura 2.7. Envolverte de paneles de chapa, Theatre Agora. Lelystad-Haven, Holanda	19
Figura 2.8. Envolverte de madera edificio de viviendas, Sabadell	19
Figura 2.9. Envolverte de muro cortina. Torre de cristal, Madrid	20
Figura 2.10. Envolverte de muro cortina y protecciones solares. Torre del agua, Zaragoza	20
Figura 2.11. Envolverte industrializada, construcción edificio en EEUU	22
Figura 2.12. Soluciones de envolvertes industrializadas en diferentes materiales	23
Figura 2.13. Solución de envolverte de fachada ventilada	26
Figura 2.14. Solución de envolverte de fachada SATE	26
Figura 2.15. Fachada Vegetal del Palacio de Europa de Vitoria-Gasteiz	27
Figura 2.16. Fachada con paneles de captación solar fotovoltaica (Iledo)	27
Figura 2.17. Fachada de doble piel acristalada, “Delegación Territorial de Sanidad y Consumo” en Bilbao	28
Figura 2.18. Fachada de doble piel resuelta en chapa perforada de la “Romo Kultur Etxea”	28
Figura 2.19. Fachada dinámica del Edificio Royal Melbourne Institute of Technology	29
Figura 2.20. Fachada dinámica del Abu Dhabi Investment Council	29
Figura 2.21. Fachada del intercambiador de transportes. Tenerife	32
Figura 2.22. Radiación solar, parte incidente y reflejada	33
Figura 2.23. Distribución de la presión dinámica por zonas	35
Figura 2.24. Presiones ejercidas por el viento en una construcción diáfana	36

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Figura 2.25. Diafragmas multi-orificio utilizados con conducciones hidráulicas	36
Figura 2.26. Evolución del régimen laminar a turbulento	40
Figura 2.27. Perfil de velocidades en régimen laminar	40
Figura 2.28. Perfil de velocidades en régimen turbulento	41
Figura 2.29. Flujo laminar en sala blanca para proteger el material o al operario	42
Figura 2.30. Respuesta a la radiación solar de una superficie negra y blanca (37°C Temp aire).	45
Figura 2.31. Coeficiente de absorción con diferentes tamaños de agujeros.	46
Figura 2.32. Coeficiente de absorción con diferentes formas de agujeros.	47
Figura 2.33. Estadio San Mamés. Bilbao-España. Acero galvanizado y lacado	52
Figura 2.34. Club deportivo. Jaén-España. Aluminio lacado	52
Figura 2.35. Facultad de gastronomía. San Sebastián-España. Aluminio anodizado	52
Figura 2.36. Centro deportivo. Madrid-España. Acero galvanizado lacado	53
Capítulo 3 Metodología de trabajo	55
Figura 3.1. Esquema de la metodología utilizada	57
Figura 3.2. Fotografías edificio Escuela de Ingeniería Bilbao de día y de noche	62
Figura 3.3. Modelo utilizado para la simulación en Ansys	63
Figura 3.4. Resultado simulación con el programa Soundflow	64
Figura 3.5. Simulación térmica con el software Design Builder	65
Capítulo 4 Caracterización mecánica	69
Figura 4.1. Ficha técnica del Acero DX51D Z275	73
Figura 4.2. Ficha técnica del Aluminio AW5754H111	73
Figura 4.3. Ficha técnica del Aluminio AW1050H24	74
Figura 4.4. Variable geometría de los agujeros presentes en las chapas	75
Figura 4.5. Patrones de perforación de las chapas	75
Figura 4.6. Acabados en los bordes de las chapas	76
Figura 4.7. Porcentaje de área abierta	76
Figura 4.8. Vectores de desplazamientos del elemento	81
Figura 4.9. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento Aplicando el principio de los desplazamientos virtuales	83

Figura 4.10. Elección para nuestras simulaciones de análisis estructural y método de resolución h	85
Figura 4.11. Modelo de chapa perforada en ANSYS para una presión de viento de 0,9 kN/m ²	89
Figura 4.12. Modelo de chapa sin perforar en ANSYS para una presión de viento de 0,562 kN/m ²	89
Figura 4.13. Resultados deformación máxima, con diferentes distancias de pestaña Y en las 3 orientaciones de la presión del viento	92
Figura 4.14. Resultados deformación unitaria máxima, con diferentes distancias de pestaña Y en las 3 orientaciones de la presión del viento	92
Figura 4.15. Resultados tensión máxima, con diferentes distancias de pestaña Y en las 3 orientaciones de la presión del viento	93
Figura 4.16. Caso 1: Dobleces de pestaña lateral de mayor longitud	94
Figura 4.17. Caso 1: Análisis de las deformaciones máximas. Chapa 1500x1250	94
Figura 4.18. Caso 1: Análisis de las tensiones máximas. Chapa 1500x1250	95
Figura 4.19. Caso 1: Análisis de las deformaciones máximas. Chapa 2000x1000	96
Figura 4.20. Caso 1: Análisis de las tensiones máximas. Chapa 2000x1000	96
Figura 4.21. Caso 1: Análisis de las deformaciones máximas. Chapa 3000x750	97
Figura 4.22. Caso 1: Análisis de las tensiones máximas. Chapa 3000x750	98
Figura 4.23. Caso 1: Resumen de deformaciones máximas a 0°.	99
Figura 4.24. Caso 1: Resumen de deformaciones máximas a 22,5°	99
Figura 4.25. Caso 1: Resumen de deformaciones máximas a 45°	99
Figura 4.26. Caso 1: Resumen de tensiones máximas a 0°	100
Figura 4.27. Caso 1: Resumen de tensiones máximas a 22,5°	100
Figura 4.28. Caso 1: Resumen de tensiones máximas a 45°	100
Figura 4.29. Caso 2: Dos dobleces de pestaña lateral de mayor longitud, el último hacia el exterior	101
Figura 4.30. Caso 2: Resumen de deformaciones máximas a 0°	103
Figura 4.31. Caso 2: Resumen de deformaciones máximas a 22,5°	103
Figura 4.32. Caso 2: Resumen de deformaciones máximas a 45°	104
Figura 4.33. Caso 2: Resumen de tensiones máximas a 0°	105
Figura 4.34. Caso 2: Resumen de tensiones máximas a 22,5°	105
Figura 4.35. Caso 2: Resumen de tensiones máximas a 45°	105
Figura 4.36. Caso 3: Dos dobleces de pestaña lateral de mayor longitud, el último hacia el interior	106
Figura 4.37. Caso 3: Resumen de deformaciones máximas a 0°	108
Figura 4.38. Caso 3: Resumen de deformaciones máximas a 22,5°	108

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Figura 4.39. Caso 3: Resumen de deformaciones máximas a 45º	108
Figura 4.40. Caso 3: Resumen de tensiones máximas a 0º	110
Figura 4.41. Caso 3: Resumen de tensiones máximas a 22,5º	110
Figura 4.42. Caso 3: Resumen de tensiones máximas a 45º	111
Figura 4.43. Caso 4: Un doblez en todos los laterales de la chapa	112
Figura 4.44. Caso 4: Resumen de deformaciones máximas a 0º	113
Figura 4.45. Caso 4: Resumen de deformaciones máximas a 22,5º	114
Figura 4.46. Caso 4: Resumen de deformaciones máximas a 45º	114
Figura 4.47. Caso 4: Resumen de tensiones máximas a 0º	115
Figura 4.48. Caso 4: Resumen de tensiones máximas a 22,5º	116
Figura 4.49. Caso 4: Resumen de tensiones máximas a 45º	116
Figura 4.50. Caso 4: Un doblez en todos los laterales de la chapa	117
Figura 4.51. Caso 5: Resumen de deformaciones máximas a 0º	118
Figura 4.52. Caso 5: Resumen de deformaciones máximas a 22,5º	119
Figura 4.53. Caso 5: Resumen de deformaciones máximas a 45º	119
Figura 4.54. Caso 5: Resumen de tensiones máximas a 0º.	120
Figura 4.55. Caso 5: Resumen de tensiones máximas a 22,5º	121
Figura 4.56. Caso 5: Resumen de tensiones máximas a 45º	121
Figura 4.57. Disposición de la zona de ensayos de las muestras de chapa	123
Figura 4.58. Sección de apoyo de las muestras de chapa perforada	123
Figura 4.59. Sistema de unión de las muestras a la base de apoyo	123
Figura 4.60. Estructura soporte de los transductores de desplazamiento	124
Figura 4.61. Fijación de los transductores a la estructura soporte	125
Figura 4.62. Sistema de adquisición de datos HBM	125
Figura 4.63. Muestra de chapa inicio de ensayo	126
Figura 4.64. Muestra de chapa tercer escalón de carga del ensayo	126
Figura 4.65. Simulación del comportamiento de la muestra de chapa perforada	127
Figura 4.66. Muestras de chapa en acero ensayadas a) un doblez y b) dos dobleces	128
Figura 4.67. Muestras de chapa en acero y aluminio que se han ensayado	129
Figura 4.68. Escalones de carga de la muestra de chapa perforada en acero	129

Figura 4.69. Comparación comportamiento casos estudio acero espesor 1,5mm	133
Figura 4.70. Comparación comportamiento casos estudio acero espesor 2,0mm	133
Figura 4.71. Comparación comportamiento casos estudio aluminio espesor 1,5mm	134
Figura 4.72. Comparación comportamiento casos estudio aluminio espesor 2,0mm	135
Capítulo 5 Caracterización fluido-dinámica	141
Figura 5.1. Componentes del Túnel de viento	144
Figura 5.2. Disposición de los manómetros en el túnel de viento	145
Figura 5.3. Transmisor de presión diferencial KIMO CP 210	146
Figura 5.4. Manómetro portátil KIMO MP 120	146
Figura 5.5. Disposición R-T de las perforaciones	148
Figura 5.6. Rebaje generado en la chapa perforada	152
Figura 5.7. Configuración primer ensayo, posición de la probeta	153
Figura 5.8. Configuración segundo ensayo, posición de la probeta	153
Figura 5.9. Configuración del tercer ensayo, con la lámina elástica	154
Figura 5.10. Variador de frecuencia utilizado en el Túnel de viento	154
Figura 5.11. Disposición de la regla para medir la deformación	156
Figura 5.12. Clasificación de la velocidad del viento: Escala de Beaufort	157
Figura 5.13. Velocidades máximas obtenidas en el ensayo 1	158
Figura 5.14. Velocidades máximas obtenidas en el ensayo 2 Velocidad (m/s)	159
Figura 5.15. Velocidades máximas obtenidas en el ensayo 3	160
Figura 5.16. Deformación en función de la velocidad en el ensayo 1	162
Figura 5.17. Deformación en función de la velocidad en el ensayo 2	163
Figura 5.18. Deformación en función de la velocidad en el ensayo 3	164
Figura 5.19. Incremento de presión en función de la velocidad en el ensayo 1	165
Figura 5.20. Incremento de presión en función de la velocidad en el ensayo 2	166
Figura 5.21. Incremento de presión en función de la velocidad en el ensayo 3	166
Figura 5.22. Variación de presión en la cámara en función de la velocidad ensayo 1	167
Figura 5.23. Variación de presión en la cámara en función de la velocidad ensayo 2	168
Figura 5.24. Variación de presión en la cámara en función de la velocidad ensayo 3	168

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Figura 5.25. Variación de la Temperatura-Velocidad ensayo 1	169
Figura 5.26. Variación de la Temperatura-Velocidad ensayo 2	169
Figura 5.27. Variación de la Temperatura-Velocidad ensayo 3	170
Figura 5.28. Variación del número de Reynolds en función de la velocidad ensayo 1	172
Figura 5.29. Variación del número de Reynolds en función de la velocidad ensayo 2	173
Figura 5.30. Variación del número de Reynolds en función de la velocidad ensayo 3	173
Figura 5.31. Fijación rígida de las muestras de chapa	174
Figura 5.32. Variación de la deformación en función de la velocidad en las muestras de chapa. Ensayo 1 (unión rígida)	176
Figura 5.33. Variación de la deformación en función de la velocidad en las muestras de chapa. Ensayo 2 (unión rígida)	177
Figura 5.34. Variación de la deformación en función de la velocidad en las muestras de chapa. Ensayo 3 (unión rígida)	179
Figura 5.35. Variación del nº de Reynolds en función de la velocidad en las muestras de chapa. Ensayo 1 (unión rígida)	180
Figura 5.36. Variación del nº de Reynolds en función de la velocidad en las muestras de chapa. Ensayo 2 (unión rígida)	181
Figura 5.37. Variación del nº de Reynolds en función de la velocidad en las muestras de chapa. Ensayo 3 (unión rígida)	181
Capítulo 6 Caracterización acústica	189
Figura 6.1. Límites de audición humana. Umbral de dolor	193
Figura 6.2. Nivel de intensidad del sonido y ambientes característicos	194
Figura 6.4. Aislamiento	195
Figura 6.5. Absorción	195
Figura 6.6. Espectro típico del ruido del tráfico según la NBE-CA-88	197
Figura 6.7. Espectro típico del ruido de aviones en operación de despegue	198
Figura 6.8. Espectro típico del ruido de un tren TGV-PSE a 270 Km/h	198
Figura 6.9. Interfaz del programa AFMG SoundFlow	199
Figura 6.10. Sección 2 del interfaz. Modelo 1. d=500 mm. Características de la chapa perforada	201
Figura 6.11. Sección 1 del interfaz Modelo 1. d=500 mm	201
Figura 6.12. Resultado Coeficiente de Absorción. d=500 mm. Modelo 1	202
Figura 6.13. Resultado Coeficiente de Absorción d=700 mm. Modelo 1	202
Figura 6.14. Resultado Coeficiente de Absorción d=800 mm. Modelo 1	202
Figura 6.15. Resultado Coeficiente de Absorción d=1000 mm. Modelo 1	203

Figura 6.16. Sección 2 del interfaz. Modelo 1. $\varnothing=1$ mm.	204
Figura 6.17. Resultado Coeficiente de Absorción $\varnothing=1$ mm. Modelo 1	204
Figura 6.18. Resultado Coeficiente de Absorción $\varnothing=3$ mm Modelo 1	204
Figura 6.19. Resultado Coeficiente de Absorción $\varnothing=5$ mm. Modelo 1	204
Figura 6.20. Resultado Coeficiente de Absorción $\varnothing=10$ mm. Modelo 1	205
Figura 6.21. Resultado Coeficiente de Absorción $p=35\%$. Modelo 1	206
Figura 6.22. Resultado Coeficiente de Absorción $p=40\%$. Modelo 1	206
Figura 6.23. Resultado Coeficiente de Absorción $p=45\%$. Modelo 1	206
Figura 6.24. Resultado Coeficiente de Absorción $p=50\%$. Modelo 1	207
Figura 6.25. Vista general de la cámara acústica y de la parte abierta	208
Figura 6.26. Vista general de la cámara aislada junto con los detalles de las distintas partes	209
Figura 6.27. Detalle de la colocación de la fuente sonora en la cámara acústica	209
Figura 6.28. Detalle de la zona de la cámara donde se coloca el sonómetro	210
Figura 6.29. Sonómetro Bruel & Kjaer 2250 Light. (Sonómetro de Tipo 1)	210
Figura 6.30. Fuente emisora sonora Bruel & Kjaer	211
Figura 6.31. Cámara acústica con la fuente y el sonómetro	212
Figura 6.32. Colocación de una chapa para la medición con la tapa superior de la cámara abierta	213
Figura 6.33. Valores para la chapa R2T4 ALU	214
Figura 6.34. Valores de las mediciones del nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A para todas las muestras	215
Figura 6.35. Valores de las mediciones del nivel medio de presión sonora continuo equivalente ponderado A para todas las muestras	216
Capítulo 7 Caracterización térmica	221
Figura 7.1. Incidencia de la radiación solar en los edificios	226
Figura 7.2. Ejemplos de edificios con captación solar directa	227
Figura 7.3. Soluciones de protección solar interior y exterior	229
Figura 7.4. Fachadas con sistemas de protección solar exterior integrados	229
Figura 7.5. Esquemas de protecciones exteriores solares pasivas	230
Figura 7.6. Edificio con fachada activa (captación de energía solar) que hace de protección solar	230

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Figura 7.7. Protección solar mediante árboles de hoja caduca	231
Figura 7.8. Las láminas de chapa perforada hacen de envolvente transparente, traslucida y transpirable.	232
Figura 7.9. Posición del sol en la bóveda celeste durante los equinoccios (Mecánica solar)	233
Figura 7.10. Inclinação de la radiación solar y su incidencia en los huecos de fachada	234
Figura 7.11. Perforación R-T Catalogo RMIG	236
Figura 7.12. Influencia del espesor en el paso del haz de luz	238
Figura 7.13. Influencia del diámetro del agujero en el paso del haz de luz	239
Figura 7.14. Selección de las orientaciones parciales establecidas	240
Figura 7.15. Variación del área efectiva en función de la latitud. Diámetro 3mm	246
Figura 7.16. Variación del área efectiva en función de la latitud. Diámetro 5mm	246
Figura 7.17. Variación del área efectiva en función de la latitud. Diámetro 10mm	246
Capítulo 8 Caracterización visual	255
Figura 8.1. Disposición de los paneles de chapa perforada de muestra para realizar la encuesta	258
Figura 8.2. Resultados de la encuesta realizada. Ambas distancias	259
Figura 8.3. Grafica comparativa de resultados, para la distancia de 1m	260
Figura 8.4. Grafica comparativa de resultados, para la distancia de 5m	261
Figura 8.5. Respuestas positivas para cada muestra. Ambas distancias	261

INDICE DE TABLAS:

Capítulo 2 Introducción	13
Tabla 2.1.- Coeficientes para cada tipo de entorno	35
Tabla 2.2.- Coeficientes eólico en edificios de pisos	36
Capítulo 4 Introducción	69
Tabla 4.1. Disposición R-T. Fórmula para obtener el área abierta y número de agujeros	77
Tabla 4.2. Fórmulas para establecer el área abierta y el número de agujeros, en otras configuraciones	78
Tabla 4.3. Valores correspondientes al coeficiente de exposición C_e	87
Tabla 4.4. Coeficiente eólico en función de la esbeltez en edificios de varios pisos	87
Tabla 4.5. Resultados Modelos de ANSYS en la chapa perforada y sin perforar	90
Tabla 4.6. Pesos de las muestras de chapa utilizadas y sus características	128
Tabla 4.7. Resultados deformaciones máximas en las muestras ensayadas	130
Tabla 4.8. Comparación resultados deformaciones máximas en muestras ensayadas y modelos FEM	136
Capítulo 5 Caracterización fluido-dinámica	141
Tabla 5.1. Denominación de las muestras utilizadas	147
Tabla 5.2. Características de las probetas	151
Tabla 5.3. Área perforada-Velocidad obtenida	161
Tabla 5.4. Deformaciones máximas en los tres ensayos	161
Tabla 5.5. Valores del Reynolds obtenidos en el ensayo 1	171
Tabla 5.6. Valores del Reynolds obtenidos en el ensayo 2	171
Tabla 5.7. Valores del Reynolds obtenidos en el ensayo 3	172
Tabla 5.8. Velocidad máxima de entrada en cada uno de los tipos de ensayo (unión rígida)	175
Tabla 5.9. Deformaciones máximas en el ensayo 1 (unión rígida)	176
Tabla 5.10. Deformaciones máximas en el ensayo 2 (unión rígida)	178
Tabla 5.11. Deformaciones máximas en el ensayo 3 (unión rígida)	179
Tabla 5.12. Resumen de propiedades ensayadas. Ensayo 1. Unión articulada.	182
Tabla 5.13. Resumen de propiedades ensayadas. Ensayo 2. Unión articulada	183

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Tabla 5.14. Resumen de propiedades ensayadas. Ensayo 3. Unión articulada	183
Tabla 5.15. Resumen de propiedades ensayadas. Ensayo 1. Unión rígida	183
Tabla 5.16. Resumen de propiedades ensayadas. Ensayo 2. Unión rígida	184
Tabla 5.17. Resumen de propiedades ensayadas. Ensayo 3. Unión rígida	184
Capítulo 6 Caracterización acústica	189
Tabla 6.1. Coeficientes de absorción acústica de algunos materiales	196
Tabla 6.2. Valores de la medición del ruido de fondo	212
Tabla 6.3. Valores de la medición de la fuente sonora	213
Tabla 6.4. Valores para la chapa R2T4 ALU	214
Tabla 6.5. Características de las muestras ensayadas	215
Capítulo 7 Caracterización térmica	221
Tabla 7.1. Resultados Bilbao, Diámetro 3mm	241
Tabla 7.2. Resultados Bilbao, Diámetro 5mm	242
Tabla 7.3. Resultados Bilbao, Diámetro 10mm	242
Tabla 7.4. % área efectiva Sevilla todos los diámetros	243
Tabla 7.5. % área efectiva Bilbao todos los diámetros	243
Tabla 7.6. % área efectiva Paris todos los diámetros	244
Tabla 7.7. % área efectiva Copenhague todos los diámetros	244
Tabla 7.8. Datos de irradiancia y energía obtenidas de programa Solea2	248
Tabla 7.9. Resultados de gráficos de Ganancia y Energía Caso Bilbao Fachada Norte	248
Tabla 7.10. Resultados de gráficos de Ganancia y Energía Caso Bilbao Fachada Este	249
Tabla 7.11. Resultados de gráficos de Ganancia y Energía Caso Bilbao Fachada Oeste	249
Tabla 7.12. Resultados de gráficos de Ganancia y Energía Caso Bilbao Fachada Oeste	250
Tabla 7.13. Tabla resumen de minoración de energía en función de la latitud y el diámetro de la perforación, con una superficie de área abierta del 50%	251
Capítulo 8 Caracterización visual	255
Tabla 8.1. Características de las muestras utilizadas para realizar la encuesta	258

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1.- INTRODUCCION

En la presente tesis se analiza una tipología concreta de solución de fachada, denominada fachada de doble piel. Las fachadas son unos de los elementos principales de los edificios, por su componente estética y por su protección del edificio del ambiente interior, que protegemos para el desarrollo de una determinada actividad frente al ambiente exterior.

El sector de la construcción es uno de los mayores consumidores de recursos, de hecho cerca de un 40% de los recursos utilizados en el planeta son destinados a la construcción y utilización de los edificios [001]. Esta es una de las causas principales que se han planteado como punto de mejora en las acciones frente al cambio climático. Hay que tratar de reducir el impacto que generan los edificios en el entorno, mediante el uso de materiales y soluciones constructivas más eficientes.

La fachada es el elemento frontera entre el interior y el exterior del edificio, por ello es de suma importancia realizar una correcta caracterización, del mismo para generar el menor impacto posible en el consumo energético del edificio, a lo largo de toda la vida útil del mismo, que según la normativa, puede ser de más de 50 años en el caso de las edificaciones residenciales. Y tenemos que tener en cuenta que muchos edificios presentan una vida útil mucho mayor a la establecida por la normativa. Si lo hacen de forma poco eficiente, el consumo energético que se genera, es mucho mayor y ello supone una gran cantidad de emisiones de CO₂ que se lanzan a la atmosfera, por una ineficiencia.

Con el paso del tiempo se han ido utilizando diferentes materiales, lo que ha generado multitud de tipologías de fachadas, fácilmente diferenciables con las distintas épocas, inicialmente se utilizaban las fachadas de piedra, en donde se podía diferenciar, entre la mampostería o sillería. El adobe es otro material que se ha utilizado mucho en el pasado en la construcción de fachadas. El Ladrillo, ha sido el rey de las soluciones de cerramientos en las últimas décadas, con las fachadas de una hoja, y posteriormente con las fachadas de doble hoja, encontrándose visto desde el exterior o recubierto con morteros.

Estos materiales se han ido utilizando en sus inicios, para realizar la función de cerramiento de los edificios, aunque también tenían una función estructural, al servir las fachadas como elementos portantes, que servían de soporte de los edificios, estos muros portantes servían de apoyo a los elementos resistentes que conformaban los forjados y las cubiertas de los edificios. Posteriormente cuando se separó la estructura de los cierres, creando sistemas estructurales formados por pórticos de pilares y vigas, la fachada de los edificios se aligeró, reduciendo considerablemente su espesor y buscando otros materiales que pudiesen realizar la función de cerramiento sin los requisitos estructurales. En este sentido se fueron estableciendo soluciones normalizadas para los diferentes entornos ambientales, que no presentasen problemas, tanto resistentes como funcionales, aunque no se realizaba un estudio detallado sobre las mismas.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

En la actualidad, la normativa vigente en edificación es el Código Técnico de la Edificación [002] denominado CTE, permite abrir muchísimo el abanico de soluciones constructivas de fachadas y cerramientos, utilizando una gama más amplia de materiales constructivos, en la que se pueden encontrar materiales con diferentes texturas, como el vidrio, el ladrillo, la madera, metales, o morteros, soluciones compuestas como los paneles de diferentes materiales que pueden conformar una paquete compacto, y una amplia gama de materiales aislantes como el poliestireno, poliuretano, fibras de madera, o el corcho entre otros. Todos estos materiales tienen que cumplir una serie de requisitos, para garantizar los requisitos básicos exigidos por la normativa, como es la funcionalidad, la seguridad y la salubridad. Hoy en día, la resolución de las fachadas se realiza mediante un estudio más exhaustivo del edificio, su ubicación, climatología, materiales utilizados y solución constructiva utilizada.

A las tradicionales soluciones constructivas de una o dos hojas que componen los cerramientos, también denominadas fachadas de fábrica [003], en la actualidad hay que sumarle otras soluciones constructivas, que se utilizan de forma generalizada hoy en día como son los muros cortina (muros de vidrio), fachadas ventiladas, fachadas vegetales, fachadas de doble piel, o fachadas prefabricadas de paneles que pueden ser ligeras o pesados, entre otras.

La tendencia actual en la construcción de edificios y sus diferentes elementos constructivos es la industrialización, con el objetivo de reducir los costes, mejorar la productividad y aumentar la calidad de los edificios construidos.

La construcción industrializada, consiste en un sistema de construcción cuyo diseño de producción es mecanizado, en el que todos los subsistemas y componentes se han integrado en un proceso global de montaje y ejecución para acelerar su construcción, en muchos casos conlleva la prefabricación de elementos que son trasladados a la obra para su posterior ensamblaje [004].

Este cambio conlleva modificar los procesos constructivos de los edificios, de modo que se busca reducir los tiempos de ejecución, para ello el diseño utilizado requiere ser estandarizado y la producción automatizada, de esta forma, se consigue mejorar la productividad del proceso. También se mejora la no dependencia frente a la climatología, ya que en la construcción industrializada, los sistemas utilizados no se construyen al aire libre, pasan a fabricarse en el interior de una industria y por lo tanto, la obra no es tan dependiente de la climatología: lluvia, viento, sol, o nieve, ya que en el sitio únicamente se ensamblan las piezas previamente prefabricadas. La siniestralidad laboral se ve reducida en entornos industriales que se encuentran más controlados y las condiciones laborales son más favorables. Del mismo modo se mejora la sostenibilidad del proyecto, ya que el realizar los elementos constructivos en una industria reduce la generación de residuos y mejora el control de calidad de los elementos fabricados lo que permite aumentar su calidad y con ello su durabilidad.

Entre los materiales que tienen una mayor experiencia en el campo de la industrialización se encuentran los elementos transformados de la industria del acero, que trabaja en múltiples sectores como automoción, aeronáutica, fabricación, y también construcción. En este campo se fabrican multitud de productos para el sector de la construcción en base acero, como son: Perfiles laminados, conformados o soldados, tubos, cables o chapas, que pueden tener diferente usos en función del sistema constructivo que se plantee, bien como elementos

principales o estructurales como, pilares, vigas, o forjados, pero también como elementos secundarios, que permitan resolver los cerramientos y las cubiertas.

También hay que resaltar otros materiales que tienen una amplia experiencia en la prefabricación como son el hormigón y la madera. En este sentido la presente tesis se centra en el análisis estructural de fachadas resueltas con chapas metálicas de acero o de aluminio. El estudio realizado se plantea en las fachadas denominadas de doble piel.

Una fachada de doble piel, es aquella que está constituida con dos sistemas o "pieles" separados por un espacio intermedio que se encuentra ventilado, de forma que sus prestaciones desde el punto de vista energético se ven mejoradas, en algunos casos.

Este apartado es de gran interés para poder mantener o crear un micro-clima alrededor del propio edificio, pues la doble fachada actúa como una prenda de ropa en las personas, regulando por una parte la temperatura, pero también está la doble piel, que permite resguardarlo de ciertos agentes exteriores, como puede ser el viento o la lluvia, aunque la protección de la radiación solar, es la actual función principal. Aunque también hay que mencionar, que muchas veces se utiliza esta tipología constructiva para obtener una cierta estética en el edificio y también para crear las sensaciones de movimiento, por la versatilidad de sus soluciones en colores, texturas o acabados.

Como ya se ha comentado, la función principal de este tipo de fachadas es la estética y la protección frente a la radiación. Cuando la radiación solar entra en contacto con la superficie de las fachadas del edificio, parte de esta energía es absorbida en forma de calor que se transmite al interior de los edificios y también otra parte se refleja al entorno urbanizado. La parte de la energía que es absorbida, acaba llegando al interior del edificio, aumentando su temperatura. Esta es una de las principales razones por las cuales este tipo de fachadas de doble piel, son más utilizadas en zonas que presentan una mayor exposición solar y climas cálidos, donde se recomienda utilizarlos principalmente en las fachadas con orientación sur, que son las que reciben una mayor incidencia solar, y es debido a que el espacio que se encuentra entre las dos fachadas permite disipar parte de la transmisión de calor que se genera, o bien del interior al exterior del edificio o viceversa.

Otras ventajas que se pueden obtener por el uso de esta tipología de fachadas son [005]:

- Permite plantear una solución constructiva industrializada, que es capaz de cubrir el edificio con piezas de grandes dimensiones y peso reducido, lo que permite acelerar el proceso constructivo y reducir los costes de ejecución.
- Se disminuyen las ganancias solares en verano por la incorporación de un sistema de protección solar, que actúa de forma similar a las lamas, permitiendo realizar una mayor protección frente a la radiación (cubriendo zonas acristaladas y ciegas). Hace que la doble piel actúe como una sombrilla generando un espacio intermedio con temperaturas más bajas que las exteriores, reduciendo las ganancias de calor en el interior y contribuye al ahorro energético de los edificios.
- Colocar esta doble piel genera también un nuevo obstáculo, frente a la transmisión de las ondas acústicas, con lo que se permite mejorar las condiciones acústicas en el interior de los edificios, principalmente frente al ruido exterior.

- En las estaciones más frías, esta doble piel metálica, permite captar más rápidamente la radiación solar y hace que la doble piel actúe como un colector solar generando un espacio intermedio con temperaturas más altas que las exteriores. Ello ayuda a reducir las pérdidas de calor interiores y contribuir al ahorro energético de los edificios.
- Del mismo modo, la doble piel mejora las condiciones de confort presentes en proximidad de las hojas que componen la fachada, al evitar el efecto de pared fría, o pared caliente que se da en el interior de los edificios.
- La chapa perforada genera un velo alrededor del edificio que aumenta la privacidad de los usuarios del edificio por el día, donde los altos niveles de iluminación impiden observar tras la chapa perforada, pero desde el interior si que se puede observar el exterior.
- Un factor a tener en cuenta en la definición de las fachadas de doble piel, es la garantía de las condiciones de iluminación natural, para tratar de reducir en lo posible la dependencia de la iluminación artificial, esto es debido principalmente a que la doble piel recoge la radiación solar externa, pero genera zonas de sombra en el interior de los edificios, que en algunos casos, requieren del apoyo de la iluminación artificial para poder garantizar los niveles de iluminación adecuados.

1.2.- OBJETIVOS

El objetivo principal que se ha seguido en el desarrollo de la presente tesis doctoral, es la caracterización de las soluciones de fachadas de doble piel resueltas en base al uso de una segunda piel en la fachada, compuesta en este caso por una chapa de acero o de aluminio que presenta diferentes patrones de perforación. Esta caracterización se va a llevar a cabo en los siguientes ámbitos:

- En el comportamiento mecánico resistente, analizando la sección que va a permitir soportar mejor los esfuerzos principales ligados a la acción del viento, de forma que se encuentren limitadas las deformaciones y tensiones máximas obtenidas.
- En el comportamiento fluido dinámico, analizando la influencia del viento en su paso por los agujeros presentes en la chapa perforada.
- En el comportamiento acústico, analizando los efectos del posicionamiento de la chapa perforada sobre la fachada.
- En el comportamiento térmico, analizando la mejoría que produce la presencia de la chapa perforada en la reducción de la radiación solar incidente.
- En el comportamiento visual, analizando el confort de los usuarios que utilizan el edificio, para poder ver el exterior a través de un velo, presente en la fachada.

Estos patrones de perforación realizados mediante el punzonamiento de la chapa, se realizan de forma homogénea sobre la misma, de modo que se consigue un grado de perforación uniforme, o también se puede realizar mediante la combinación de diferentes patrones,

combinando diferentes diámetros de punzones y en diferentes posiciones, de esta forma el grado de perforación no es uniforme en la totalidad de la superficie, pero se mejora considerablemente la estética de los edificios resueltos con este tipo de fachadas.

Los patrones de perforación están basados en modificar tres parámetros:

- el diámetro de los agujeros realizados, en la mayoría de los casos, estos agujeros son de sección circular, aunque también se realizan perforaciones con sección cuadrada, triangular, o la sección que se quiera plantear por estética del edificio.
- la separación entre dichos agujeros, esto es la distancia, que se plantea entre los elementos punzonados.
- y el esquema de punzonamiento realizado, donde los agujeros se pueden encontrar en los vértices de un triángulo, de un cuadrado...etc.

Con estos tres parámetros se condiciona el valor correspondiente al porcentaje de huecos presentes en la chapa, esto es, la superficie de agujeros realizada frente a la superficie total de la chapa y que está relacionado con la cantidad de radiación solar que puede pasar a través de la misma. Este valor se aporta en porcentaje, y coincide con la superficie de chapa que ha sido eliminada por el punzonado, permitiendo el paso de la radiación solar a través de la misma.

De esta forma, las chapas que se disponen sobre la fachada del edificio, hacen una función de parasol, o velo. Esta solución de fachada de doble piel tiene la posibilidad de implantarse, tanto en edificios de nueva planta como en rehabilitaciones de edificios existentes.

Existen pocos estudios relacionados con la caracterización de este tipo de soluciones desde el punto de vista tanto de la eficiencia energética, como de la caracterización mecánica o acústica de este tipo de soluciones.

Es por ello, que la presente Tesis Doctoral plantea como objetivo principal el análisis y caracterización mecánica de las fachadas de doble piel, para su utilización en edificios de nueva planta o rehabilitaciones.

Para alcanzar este objetivo principal, se plantean varios objetivos específicos:

- a) Se ha realizado un análisis para la optimización de las soluciones de fachada de doble piel en chapa perforada, con el objetivo de estimar cuales son los parámetros de diseño más adecuado en base a las dimensiones de los elementos realizados en chapa perforada. Todas las fachadas no tienen las mismas dimensiones ni configuraciones arquitectónicas, por lo que este primer punto pretende analizar variables como las dimensiones de las chapas, los dobleces a realizar, o las distancias de dichos dobleces, para incrementar la inercia de las chapas y reducir la necesidad de uso de otros elementos auxiliares que mejoren su rigidez, lo que suele incrementar el coste de la solución planteada.

Este primer estudio de optimización se va a realizar mediante la simulación con programas de elementos finitos de una solución de fachada de doble piel tipo, en el que se van a ir introduciendo cambios en las diferentes variables mencionadas.

- b) Para calibrar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, se lleva a cabo una campaña experimental en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Industrial de

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Bilbao y en el laboratorio de Mecánica de Fluidos del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo.

Los ensayos realizados se han hecho con los medios disponibles en ambos centros y teniendo en cuenta que en algunos casos las dimensiones de estas piezas (3m de longitud por 1m de anchura) han condicionado la disponibilidad de los equipos para poder realizar los ensayos y por eso se han tenido que buscar formas de obtener la información, no tan directas.

- c) Se ha llevado a cabo un análisis fluido dinámico de una serie de muestras de chapa perforada con dos materiales, y varios patrones de perforación en un túnel de viento de cara a poder comprobar su comportamiento frente al mismo, al tratarse de la acción que produce mayores efectos en un elemento constructivo como este.
- d) De cara a plantear la colocación de una fachada de doble piel en un edificio, hay que justificar que la solución adoptada presenta otras ventajas, que se encuentran en la posible mejora desde el punto de vista de la eficiencia energética del edificio, pero también del confort acústico e incluso visual o estético. Es por ello, que se analiza en la presente tesis, cuales son las ventajas que han encontrado otros investigadores, al uso de este tipo de soluciones desde el punto de vista energético (mejora de la eficiencia energética del edificio). El objetivo de esta tesis no ha sido realizar una caracterización energética de este tipo de fachadas, cuyo desarrollo puede ser objeto de una tesis doctoral específica en esta temática.
- e) También se ha realizado un análisis del comportamiento de este tipo de fachadas, desde el punto de vista de la mejora acústica que pueden aportar estas soluciones, al disponer de un elemento adicional sobre la fachada, que permite romper la onda acústica antes de llegar a la fachada del propio edificio. Para poder realizar este análisis se ha contado con un software comercial con el que se han realizado diferentes simulaciones, en función de variables como el material utilizado, espesor de las chapas, grados de perforación diámetro y forma de los agujeros realizados. Para poder contrastar estos resultados, también se ha llevado a cabo una campaña de ensayos de laboratorio sobre una serie de muestras con diferentes grados de perforación y que ha sido realizada en el laboratorio de Mecánica de Fluidos del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo.
- f) Y por último se ha añadido un análisis desde el punto de vista social de este tipo de soluciones, dicho análisis ha medido el confort visual, que presentan los diferentes grados de perforación de los patrones, ya que si el grado de perforación es alto, esta doble piel, es como un velo muy fino que se coloca sobre el exterior del edificio y que permite a los usuarios que están en su interior ver claramente el exterior, pero a medida que este porcentaje baja, ese velo interfiere en la visión del exterior y ello puede causar molestias a los usuarios del edificio. Este análisis se ha realizado con la colaboración de un conjunto de alumnos y profesores de las Escuelas de Ingeniería Industrial de Gijón y de Bilbao. Y se ha basado en la realización de una encuesta para poder determinar el nivel de confort visual que presentaban, los patrones utilizados como muestra.

Mediante estos objetivos específicos, se ha pretendido obtener la mayor información posible del comportamiento de las soluciones de fachada de doble piel de cara a su utilización en el diseño de nuevos edificios o en la rehabilitación energética de edificios ya existentes.

Para el desarrollo de la presente tesis se ha contado también con el apoyo de 2 empresas dedicadas a la fabricación de este producto industrial, como son la empresa IMAR, que se encuentra trabajando en el sector de la edificación e industria desde 1931, suministrando chapa perforada, abocardada, estampada y metal expandido, se encuentra ubicada en Ortuella y en Miranda de Ebro. También ha participado la empresa RMIG, en el sector desde 1890 que inició su andadura en Finlandia y actualmente dispone de plantas en once países europeos, se trata de una de las principales empresas multinacionales del sector en nuestro entorno, hasta hace unos años disponía desde 1984 de una planta en el Municipio vizcaíno de Urduliz, que en 2012 tuvo que cerrar sus instalaciones por la crisis, aunque ha seguido colaborando con la UPV/EHU desde su planta de Reino Unido, enviando muestras de material con el que se han realizado diferentes ensayos.

1.3.- DESARROLLO DEL DOCUMENTO DE TESIS

La presente tesis doctoral se ha desarrollado en una serie de capítulos que se resumen a continuación:

En el Capítulo 1, se muestra el objetivo general que se pretende alcanzar en el desarrollo de la investigación planteada, con relación a la caracterización mecánica, acústica y térmica de las fachadas de doble piel resueltas mediante chapa perforada. Para poder alcanzar dicho objetivo, se establecen también una serie de objetivos particulares, que se muestran en el presente capítulo. También se establece la estructura de capítulos en la que se ha dividido el manuscrito.

En el Capítulo 2, se muestra el estado del arte en relación a los requisitos que deben de cumplir las actuales soluciones de fachadas, junto a las soluciones constructivas más utilizadas en este sentido, sus principales ventajas e inconvenientes. Se hace una mención especial a las soluciones de fachada de doble piel, identificando las soluciones constructivas más habituales, materiales utilizados y las configuraciones constructivas

En el Capítulo 3, se establece la metodología seguida para realizar el desarrollo de la labor investigadora, que se ha basado en la realización de unos modelos de comportamiento mediante simulaciones con elementos finitos y otros programas de simulación acústica, que han sido posteriormente contrastados y refinados mediante una serie de ensayos a escala de laboratorio con muestras y piezas de tamaño real.

En el Capítulo 4, se recogen los resultados de las simulaciones ensayos realizados en la caracterización mecánica y resistente de las chapas de acero y aluminio utilizadas en la solución constructiva de envoltorio de doble piel. Identificando las dimensiones más adecuadas de los elementos constructivos utilizados de cara a establecer la solución constructiva óptima en cantidad de material utilizado, coste de la solución, así como las posibles modificaciones que se pueden realizar para su optimización.

En el Capítulo 5, se realiza un análisis fluido dinámico del comportamiento de las chapas perforadas frente al paso del aire por su sección, analizando las presiones generadas tanto en la parte exterior como en la interior. Para ello se han planteado una serie de ensayos realizados en un túnel de viento.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

En el Capítulo 6, se realiza un análisis acústico de las soluciones de fachada para comprobar las ventajas de su utilización en la reducción de los niveles de ruido aéreo que pueden conseguir, con objeto de mejorar el confort acústico en los edificios y entornos urbanos. Dicho análisis se ha realizado con herramientas de simulación y también ha sido contrastado mediante una serie de ensayos realizados en chapas reales con diferentes patrones y materiales.

En el Capítulo 7, se recopilan y analizan las ventajas que presentan este tipo de fachadas de doble piel desde el punto de vista de su eficiencia energética, se plantea una metodología para la definición del grado de perforación más adecuado en función de la ubicación del edificio, el espesor de la chapa y el porcentaje de área abierta que presenta el patrón utilizado.

En el Capítulo 8, se ha realizado un análisis del confort visual de este tipo de cerramientos, mediante una serie de encuestas realizadas sobre el análisis de una serie de muestras colocadas sobre un cerramiento interior en la Escuela de Ingeniería Industrial de Gijón, identificando el grado de confort de los usuarios frente a la visualización a través de las ventanas de los edificios.

En el Capítulo 9, se recopilan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente trabajo de investigación, e igualmente se recogen las futuras líneas de investigación que se abren.

Por último en el Capítulo 10, se recopilan todas aquellas referencias bibliográficas utilizadas en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO 2:

ESTADO DEL ARTE

2.1.- INTRODUCCION

La presente tesis plantea el análisis de una tipología concreta de solución de envolvente edificatoria, denominada “fachada de doble piel”. Las envolventes de los edificios han comenzado a cobrar una gran importancia, convirtiéndose en un elemento principal a tener en cuenta para poder conseguir reducir el impacto ambiental que generan las construcciones, asociado principalmente al consumo de energía para poder mantener unas condiciones de confort en el interior de las construcciones.

Durante mucho tiempo las fachadas han jugado un importante papel en los edificios, principalmente por su componente estética, pero hoy en día lo que se espera de ellas, se encuentra más relacionado con la protección del edificio tanto de las inclemencias climatológicas como pueden ser, el frío o calor, la lluvia, nieve, o viento, pero también de otros problemas asociados al desarrollo urbano como son la contaminación acústica o atmosférica. Y todo esto se debe realizar con la menor repercusión posible en nuestro entorno ambiental, de modo que se potencie la utilización de materiales más sostenibles, más durables, o que las soluciones constructivas sean más eficientes desde el punto de vista constructivo (industrialización), pero también desde el punto de vista de la eficiencia energética, con el objetivo principal de reducir el consumo de recursos naturales [006].

Según se define por el diccionario de la Real Academia Española, la Fachada de un edificio es: *la pared exterior del cerramiento, o cierre vertical que envuelve dando privacidad al interior y sirve de protección ante los fenómenos climáticos (lluvia, nieve, calor, frío, vientos) y otros agentes para los cuales se emplean diferentes aislamientos o soluciones constructivas*

Las fachadas de los edificios son en la actualidad, una de las partes más importantes de los mismos, ya que les aportan el grado de estética deseado por los proyectistas, y con ello la imagen que se quiera dar a los edificios. Creando en algunos casos edificios iconos de diferentes ciudades, países o empresas y que se construyen como elemento de marketing de cara a atraer visitantes o clientes (Figura 2.1).



Figura 2.1. Envolvente del Museo Guggenheim icono ciudad de Bilbao.

2.2.- MATERIALES PARA LA ENVOLVENTE DE LOS EDIFICIOS

La envolvente de los edificios se encuentra directamente relacionada con los materiales que se han ido utilizando con el paso del tiempo, lo que ha generado diferentes tipologías de fachadas, fácilmente diferenciables con las distintas épocas, inicialmente se utilizaban las fachadas de piedra, en donde se podía diferenciar, entre la mampostería, o sillería (Figura 2.2).



Figura 2.2. Envolvente de piedra Torre de Londres.

El adobe ha sido otro material que se ha utilizado mucho en la construcción de fachadas de edificios, se trata de un ladrillo sin cocer, realizada con una masa de barro en algunos casos mezclado con paja y secado al sol [007]. Este material ha sido muy utilizado en diferentes civilizaciones (Figura 2.3).



Figura 2.3. Envolvente de adobe, rascacielos de Shibam, Yemen.

Ya en la actualidad, el Ladrillo, ha sido el rey de las soluciones de cerramientos en las últimas décadas, con las fachadas de una hoja, y posteriormente con las fachadas de doble hoja para

mejorar el comportamiento térmico y evitar problemas de condensaciones en algunos climas. Se puede encontrar visto desde el exterior o recubierto con morteros [008] (Figura 2.4).



Figura 2.4. Envoltente de ladrillo, 570 Lexington Av NY.

En la actualidad, debido a la amplia gama de materiales presentes en el mercado, junto a los recursos disponibles en el mercado de cara a poder llevar a cabo las diferentes construcciones nos encontramos con soluciones de envoltentes que permiten por ejemplo, mejorar el aislamiento térmico de las mismas mediante la técnica de las fachadas ventiladas, en las que se crea una cámara de aire en el interior, con un aislamiento dispuesto contra el edificio, de forma que el aire exterior no presenta valores tan extremos al circular por la cámara por efecto del calentamiento de la hoja exterior que genera por otro lado un efecto chimenea en su interior.



Figura 2.5. Envoltente de fachada ventilada. Torre de cristal, Madrid.

También se potencia la creación de envolventes prefabricadas en diferentes materiales, para poder permitir ahorro de costes en la industrialización de la solución de fachada, así como el ahorro de tiempos de ejecución al permitir colocar grandes superficies en muy poco tiempo, con la consiguiente reducción de riesgos en el trabajo realizado [009]. Debido a la gran tradición existente en el país a trabajar en hormigón, la industria de los prefabricados de hormigón dispone de un abundante mercado de soluciones de paneles de fachada, acordes a las necesidades de los proyectistas.

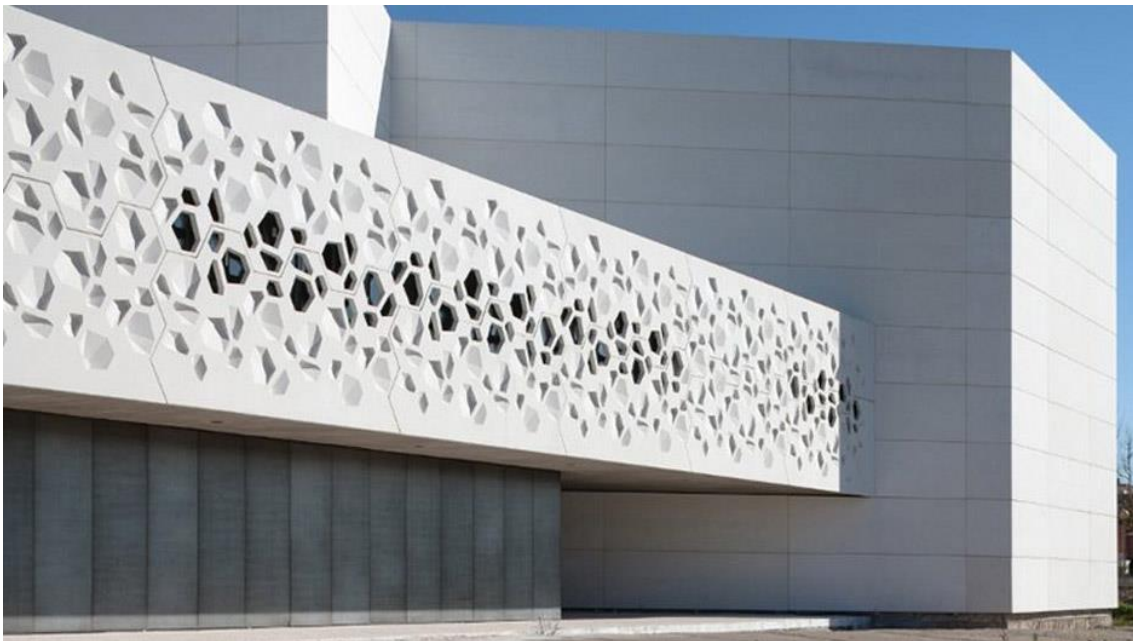


Figura 2.6. Envoltente de hormigón prefabricado, Centro de creación contemporánea. Córdoba.

Para poder reducir el peso de estas envolventes de hormigón se pueden utilizar también otras soluciones más ligeras basadas en el uso de paneles de chapa con núcleos de material aislante que permiten disponer de piezas de mayor rigidez y con ello tamaño, para su disposición en las fachadas.



Figura 2.7. Envoltante de paneles de chapa, Teatro Agora. Lelystad-Haven, Holanda [010].

Debido también a la creciente preocupación, por los efectos del cambio climático en el planeta además de la cultura existente en algunos países más nórdicos, donde la construcción se realiza con estructuras de madera, siendo este el material predominante en sus construcciones. Y aunque existen ciertas creencias populares por desterrar, es un material que hoy en día dispone de tratamientos que permiten disponerlos como soluciones de envoltantes edificatorias con este material [011].

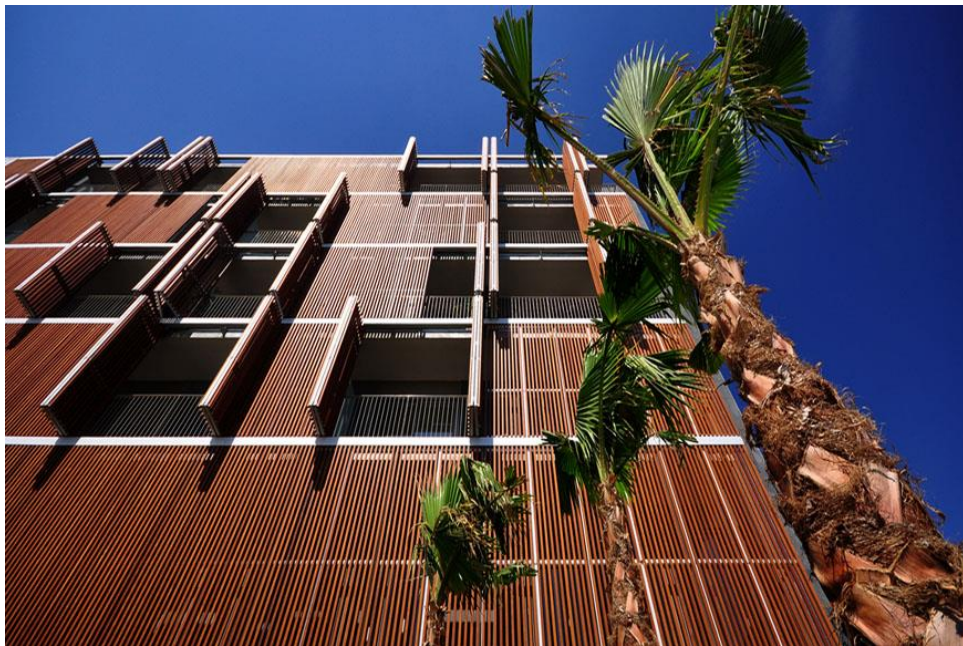


Figura 2.8. Envoltante de madera edificio de viviendas, Sabadell.

Otro de los materiales que se utiliza abundantemente en la actualidad es el vidrio, que permite disponer de grandes superficies transparentes en la envoltante del edificio, como es el caso de los muros cortina [012] (Figura 2.5).



Figura 2.9. Envoltente de muro cortina. Torre de cristal, Madrid.

Estas superficies acristaladas permiten mejorar la entrada de luz natural, y con ello reducir el consumo por la iluminación artificial, aunque hoy en día por el uso de dispositivos electrónicos, puede no ser tan interesante que entre tanta luz. Por otro lado, la radiación solar incidente en el edificio calienta su interior de forma que en algunas épocas del año es necesario refrigerar el interior, con lo que el consumo de energía aumenta. Para reducir este efecto se disponen de vidrios con prestaciones especiales que permiten filtrar parte de esa radiación. Otra solución pasa por disponer de elementos parasoles, que generen el sombreado de la fachada en ciertos momentos del día [013].



Figura 2.10. Envoltente de muro cortina y protecciones solares. Torre del agua, Zaragoza.

Muchos de estos materiales que se han ido utilizando, para realizar la función de cerramiento de los edificios, aunque inicialmente también tenían una función estructural al servir las fachadas como elementos soporte de los edificios compuestos por muros portantes en los que se apoyaban los elementos resistentes que conformaban los forjados y las cubiertas de los edificios. Posteriormente cuando se separó la estructura de los cierres, creando sistemas estructurales formados por pórticos de pilares y vigas, la fachada de los edificios se aligeró, reduciendo su espesor y buscando otros materiales que pudiesen realizar la función de cerramiento sin los requisitos estructurales iniciales. En este sentido se fueron estableciendo soluciones normalizadas para los diferentes entornos ambientales, que no presentasen problemas, tanto resistentes como funcionales, aunque no se realizaba un estudio detallado sobre las mismas.

En la actualidad, la normativa vigente (CTE en España) permite abrir muchísimo el abanico de soluciones constructivas de fachadas y cerramientos, utilizando una gama más amplia de materiales constructivos, en la que se pueden encontrar materiales con diferentes texturas, como el vidrio, el ladrillo, la madera, metales, o morteros y una amplia gama de materiales aislantes como el poliestireno, poliuretano, fibras de madera, corcho entre otros, que permite realizar soluciones compuestas como los paneles de diferentes materiales que pueden conformar una paquete compacto.

Todos estos materiales tienen que cumplir una serie de características, para garantizar los requisitos básicos exigidos por la normativa, como es la funcionalidad, la seguridad y la salubridad. Hoy en día la resolución de las fachadas requiere un estudio mucho más exhaustivo que antes del edificio, su ubicación, climatología, materiales utilizados y solución constructiva utilizada, para poder cumplir los requisitos y exigencias que presenta la normativa.

A las tradicionales soluciones constructivas de una o dos hojas de ladrillo que conformaban los cerramientos del edificio, también denominadas fachadas de fábrica, en la actualidad hay que sumarle otras muchas soluciones constructivas, que se utilizan hoy en día como son los muros cortina (muros de vidrio), fachadas ventiladas, fachadas vegetales, fachadas de doble piel, o fachadas prefabricadas de paneles que pueden ser ligeras o pesados, entre otras.

La tendencia actual en la construcción de edificios y sus diferentes elementos constructivos es la industrialización, con el objetivo de reducir los costes y los plazos, mejorar la productividad y aumentar la calidad de los edificios construidos.



Figura 2.11. Envoltura industrializada, construcción edificio en EEUU.

Se define por el diccionario de la Real Academia Española, como construcción industrializada: *el sistema de construcción cuyo diseño de producción es mecanizado, en el que todos los subsistemas y componentes se han integrado en un proceso global de montaje y ejecución para acelerar su construcción. También llamada construcción prefabricada, prefabricación*

Este cambio conlleva modificar los actuales procesos constructivos de los edificios, que a pesar de haberse industrializado durante las últimas décadas, sigue siendo un sector que utiliza mucha mano de obra, con actividades todavía muy artesanales [014]. La construcción industrializada busca reducir los tiempos de ejecución, ya que el diseño utilizado requiere ser estandarizado y la producción automatizada. También se mejora la no dependencia frente a la climatología, ya que en la construcción industrializada, los sistemas utilizados no se construyen al aire libre, pasan a fabricarse en el interior de una industria y por lo tanto, la obra no depende de la lluvia, del viento, de las olas de calor o de la nieve. La siniestralidad laboral por su parte, también se ve reducida en entornos industriales que se encuentran más controlados y las condiciones laborales son más favorables. Del mismo modo se mejora la sostenibilidad del proyecto, ya que el realizar los elementos constructivos en una industria reduce la generación de residuos al optimizar más los materiales utilizados y mejora el control de calidad de los elementos fabricados lo que permite aumentar su calidad del producto y con ello su durabilidad [015].

Entre los materiales que se utilizan en la prefabricación de soluciones de envoltura de edificios se dispone de materiales tradicionales como la cerámica, la madera, el hormigón, el vidrio o el acero.



Figura 2.12. Soluciones de envolventes industrializadas en diferentes materiales.

Entre los materiales que tienen una mayor experiencia en el campo de la industrialización se encuentran los elementos transformados de la industria del acero, que trabaja en múltiples sectores como automoción, aeronáutica, fabricación, y también construcción. En este campo, se fabrican multitud de productos para el sector de la construcción en base acero, como son: Perfiles laminados, conformados o soldados, tubos, cables o chapas, que pueden tener diferentes usos en función del sistema constructivo que se plantee, bien como elementos principales o estructurales como, pilares, vigas, o forjados, pero también como elementos secundarios, que permitan resolver los sistemas de cerramientos y cubiertas.

El acero es uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción, no solamente en las estructuras de edificación, ya que se puede encontrar en las instalaciones los cerramientos, elementos de contención, elementos auxiliares como andamios encofrados o cimbras, etc. En el campo de las estructuras es donde presenta mayores ventajas [016], como pueden ser:

Elevada resistencia por unidad de peso, lo que le confiere al acero una mayor ligereza frente a materiales como el hormigón y que es de gran importancia en el diseño de elementos con grandes luces o con grandes cargas.

Homogeneidad, sus propiedades no cambian apreciablemente con el tiempo como es el caso de las estructuras de concreto reforzado.

Durabilidad adecuada en función del ambiente en el que se encuentre, disponiendo en la actualidad de tratamientos que permiten mejorar la durabilidad del material.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Ductilidad que es la propiedad que tiene un material para poder soportar grandes deformaciones sin generar fallos, encontrándose sometida a elevados esfuerzos de tensión. La naturaleza dúctil de los aceros les permite deformarse localmente, sin generar fallos.

Tenacidad, está relacionada con la resistencia y la ductilidad, de forma que permite al material absorber energía en grandes cantidades.

Otras *ventajas* que son de gran interés en el campo de la construcción y que mediante el acero se puede llevar a cabo en el campo de la construcción se encuentran relacionadas con:

Su facilidad de unión entre elementos por medio de diferentes sistemas, como son las uniones atornilladas o soldadas.

Alta posibilidad de prefabricación, es un material que se lleva en partes a la obra, que ya han sido previamente elaboradas en taller, lo que favorece en gran medida la industrialización de la construcción.

Gran rapidez de su montaje en obra principalmente por realizar uniones atornilladas in situ, que son más sencillas de realizar que las uniones soldadas, más utilizadas en la fabricación en taller.

Es un material que presenta una elevada resistencia a la fatiga, frente a otro material muy común en construcción como es el hormigón.

A pesar de necesitar una gran cantidad de energía en su fabricación es un material que es reciclable, e incluso puede ser reutilizable, lo que reduce considerablemente el volumen de residuos en el fin de vida del edificio, frente a otras alternativas.

2.3.- SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE LA ENVOLVENTE DE LOS EDIFICIOS

Tras realizar un análisis de los diferentes materiales que son más comunes en la realización de las envolventes edificatorias, se va a analizar los diferentes tipos de soluciones constructivas de fachadas, viendo la importante evolución que ha tenido este sistema constructivo en las últimas décadas, desde la entrada en vigor del CTE (Código Técnico de la Edificación [002]), y que se ha ido incrementando con las actualizaciones del mismo y las últimas directivas relacionadas con la eficiencia energética de los edificios.

Con relación a las tipologías de las fachadas de los edificios, éstas han ido viendo modificada su morfología con el paso del tiempo, de modo que se ha pasado de las tradicionales fachadas compuestas por una sola hoja (o capa que forma la pared), a las actuales fachadas denominadas multicapa, en las que su núcleo está formado por diferentes capas, y cada una de ellas tiene un cometido determinado.

Las fachadas de una sola hoja, han sido las primeras fachadas que se utilizaron en los edificios y perduraron hasta el inicio del siglo XX. Su función principal, no era el aislamiento del espacio interior con respecto al exterior, sino que más bien, realizaban una función portante de los elementos que permitían cerrar el interior del espacio mediante un techo o cubierta. Este tipo de fachadas se encuentra formado habitualmente por un único material, o elemento constructivo, [017] por ejemplo, mampostería, ladrillo en sus diferentes versiones, macizo, perforado, hueco... y más en la actualidad también se han utilizado piezas de mayor tamaño como los bloques de hormigón que permitían realizar su materialización en menos tiempo.

Este tipo de cerramientos, tenían además de la función portante, la protección contra las inclemencias atmosféricas como el viento, el agua y las diferencias térmicas. Y con relación al espesor de este tipo de soluciones estaba condicionado por las cargas a soportar que son principalmente función de la altura de la edificación y los materiales que lo conformaban, de forma habitual se pueden encontrar soluciones constructivas de fachadas de este tipo que disponen de espesores que rondan entre los cuarenta cm y en algunos casos muros de más de un metro de espesor.

Cuando comienzan a aparecer las actuales estructuras aporticadas en materiales como el acero o el hormigón, la función portante que tenían los muros de cerramiento de los edificios pasa a un segundo plano, y se reduce su espesor permitiendo un mejor aprovechamiento del espacio construido. De esta forma las fachadas se mantienen en espesores que rondan los veinticinco a cuarenta centímetros y ya empiezan a aparecer las fachadas de doble hoja, una exterior y otra interior, con una cámara de aire en el medio que permite mejorar la estanquidad de la solución constructiva y la mejora del comportamiento térmico de la misma.

Pero hoy en día con los mayores requerimientos desde el punto de vista de la eficiencia de los edificios, las fachadas han seguido evolucionado para convertirse en elementos constructivos esenciales del edificio y que presentan soluciones mucho más eficientes, en aras de conseguir no solamente mayores niveles de aislamiento y confort térmicos [018]. También presentan mejores prestaciones para otro tipo de contaminación que es cada vez más habitual en los entornos urbanos como es la contaminación acústica, y que actualmente también presenta una normativa más estricta y que se encuentra integrada en el mismo CTE, no solo para cumplir con los requisitos normativos establecidos por las legislaciones de los diferentes países, sino también para ser capaces de satisfacer los requisitos de confort interior requerido por la sociedad actual [019].

En este sentido aparecen soluciones constructivas que son ampliamente utilizadas como es el caso de las fachadas ventiladas [020], que se encuentran formadas por dos hojas una interior que sirve de soporte al aislamiento para que el mismo se reparta de forma continua por toda la fachada, y una hoja exterior, que le permite resguardarse de las inclemencias atmosféricas, encontrando se entre ambas cara una cámara de aire, que a diferencia de las soluciones precedentes permite el movimiento del aire en su interior, así en los casos en los que la radiación este incidiendo sobre la hoja externa, el aire se desplaza hacia la parte superior de la fachada, pudiendo salir por la cubierta, y renovando el aire presente en la cámara con aire nuevo, que se encuentre a una temperatura inferior. Este hecho reduce las ganancias térmicas de calor que podrían llegar al interior del edificio, con lo que se mantiene el confort interior con un menor consumo energético. Este mismo efecto pero invertido ocurre en los periodos de invierno, con lo que está solución mejora la eficiencia de los edificios.

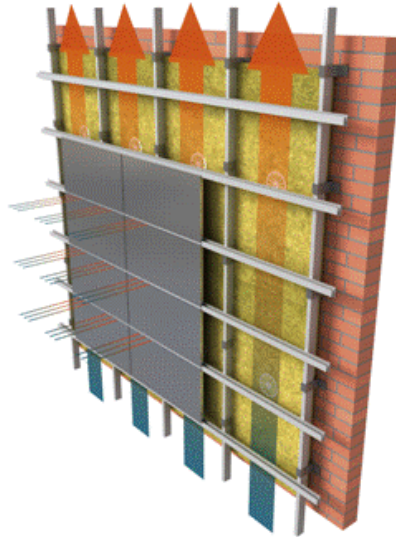


Figura 2.13. Solución de envoltorio de fachada ventilada.

Otra tipología de fachada que se utiliza en la actualidad, principalmente en las soluciones de rehabilitación aunque también en la construcción de edificios de nueva planta es la solución de fachada mediante los Sistemas de Aislamiento Térmico por el Exterior, comúnmente denominado "SATE", esta tipología de fachadas se encuentra muy extendida en los países nórdicos con especial preocupación por la rehabilitación energética de los edificios, se basa en la disposición de un aislamiento continuo por toda la envoltorio del edificio que reduce la presencia de puentes térmicos y sus problemas asociados, y reviste el aislamiento con un acabado que le permite proteger al aislamiento del exterior [021].

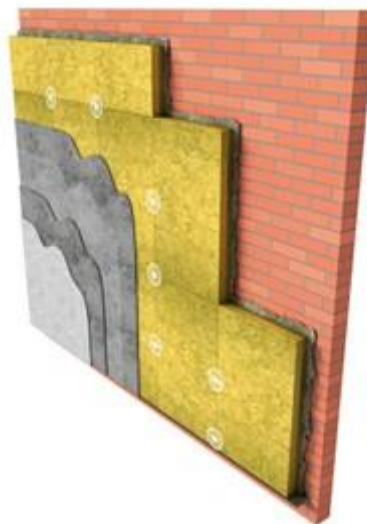


Figura 2.14. Solución de envoltorio de fachada SATE.

Las "fachadas verdes" son otra alternativa que es cada vez más utilizada gracias a los sistemas hidropónicos, que son aquellos en los que las raíces de las plantas crecen en un medio inerte, (fieltro no tejido de poliamida, polietileno o poliéster, lana de roca y espumas técnicas, como poliuretano y poliurea). En estos jardines verticales todos los nutrientes que necesitan las plantas para su crecimiento son aportados por el sistema de riego.

Entre sus principales ventajas están la reducción de la temperatura ambiental del entorno por la absorción de la radiación solar y con ello regulan la temperatura evitando el sobrecalentamiento en verano y aumentan el aislamiento del edificio en invierno. Por otro lado, permiten mejorar el aislamiento acústico de las fachadas y mejoran la calidad del aire al capturar el dióxido de carbono y producir oxígeno reduciendo la contaminación atmosférica, disminuyendo igualmente la cantidad de polvo y partículas en suspensión del aire [022].



Figura 2.15. Fachada Vegetal del Palacio de Europa de Vitoria-Gasteiz.

Además, la necesidad de conseguir edificios más sostenibles, hace de las fachadas y cubiertas de los edificios, el punto de interés de cara a la implantación de sistemas de captación de energía, como por ejemplo paneles solares, que permiten conseguir edificios más sostenibles, gracias al consumo de estas fuentes de energías renovables y de reducir el impacto ambiental generado por los edificios. Esto ha dado lugar a soluciones de fachadas de elevado rendimiento y muy innovadoras. Que permiten captar la energía solar e integrar dichas instalaciones en el consumo energético del edificio [023].



Figura 2.16. Fachada con paneles de captación solar fotovoltaica (Lledo).

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Las “fachadas de doble piel”, son una alternativa pasiva de ahorro de energía disponiendo de una doble piel, que permite reducir la radiación solar incidente en un edificio en un determinado porcentaje, función del elemento que se interpone entre la fachada y el exterior, de esta forma, en climas cálidos esta solución presenta ventajas que en algunos casos puede llegar a ahorros de hasta el 30% del consumo de energía. Por el contrario cuando el clima es más frío, se produce el efecto contrario, el calor no llega al edificio lo que supone un incremento de la demanda de calefacción en los meses de invierno [024].



Figura 2.17. Fachada de doble piel acristalada, “Delegación Territorial de Sanidad y Consumo” en Bilbao.

Y este tipo de soluciones de fachada también presentan mejoras del comportamiento acústico de las edificaciones al interponer entre el exterior del edificio y el interior otra capa que está formada por un elemento que se encarga de reducir la transmisión del ruido hacia el interior. Probablemente la mayor potencialidad de este tipo de fachadas se encuentra en la componente estética que aportan a los edificios, y que en algunos casos ese marketing es el que permite decantarse por unas soluciones frente a otras [025].



Figura 2.18. Fachada de doble piel resuelta en chapa perforada de la “Romo Kultur Etxea”.

Existen otras soluciones de fachada que también presentan mejoras del comportamiento térmico de los edificios y que permiten mejorar su eficiencia energética mediante elementos activos, que es lo que se denominan “fachadas adaptativas”. Pueden proporcionar protección solar, aprovechar la radiación solar o el viento para generar electricidad, incluir sistemas de refrigeración o proporcionar aislamiento térmico, entre otras muchas funcionalidades.

El análisis de este tipo de fachadas presenta una mayor complejidad, y aunque seguramente en el futuro se podrán encontrar soluciones de este tipo con mayor facilidad, actualmente debido al importante coste económico que presentan dichas soluciones, solamente se plantean en edificios de carácter singular, donde lo que se busca, es dotar al edificio de una imagen determinada, en este caso de alta tecnología, alto valor estético y ser un icono de edificio frente a las futuras construcciones.

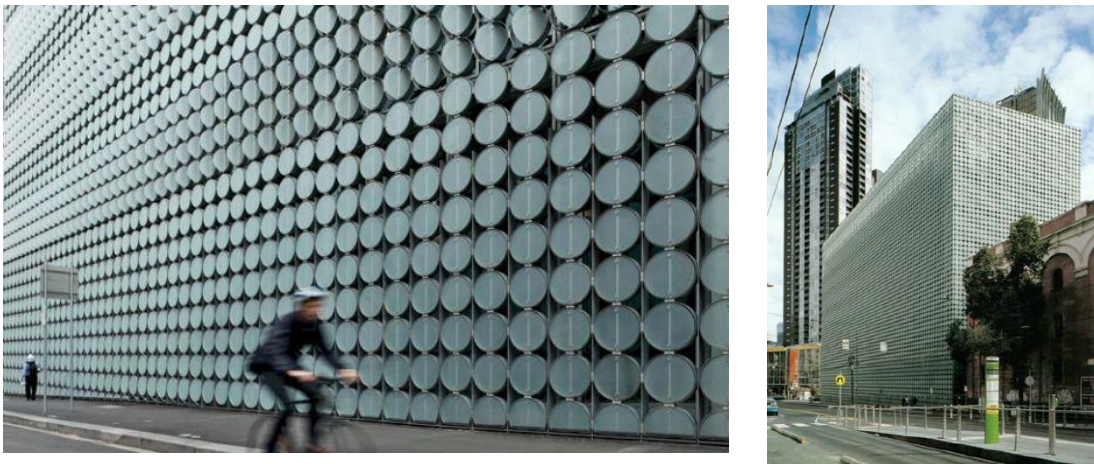


Figura 2.19. Fachada dinámica del Edificio Royal Melbourne Institute of Technology [026].

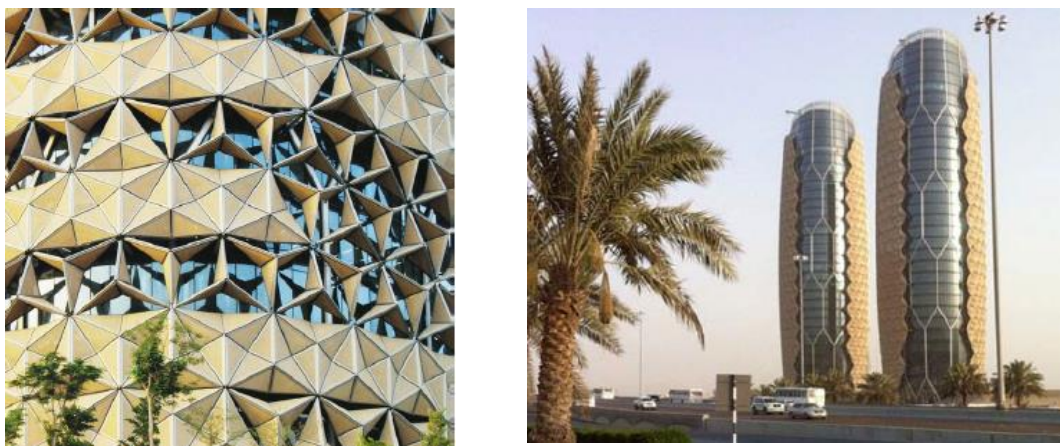


Figura 2.20. Fachada dinámica del Abu Dhabi Investment Council [027].

2.4.- EVOLUCION DE LA NORMATIVA SOBRE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO

La evolución que se ha producido en las soluciones de fachada, ha venido impuesta en España por el cambio normativo, más que por la concienciación social, el interés por la conservación

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

del planeta o la reducción del consumo de energía. La primera normativa que aparece en el país en materia de eficiencia energética, entró en vigor en el año 1979, y es la denominada Normativa Básica de Edificación, que disponía de un apartado dedicado a las condiciones térmicas que tenían que disponer los edificios (**NBE-CT-1979**) [028]. Esta normativa se implantó en una época de crisis energética, en la que el precio de los combustibles se disparó y con ello el gasto en las economías familiares, que utilizaban el petróleo para calefactar los edificios, de esta forma los edificios a partir de esa fecha iban a disponer de un aislamiento, que permitía reducir las pérdidas energéticas.

Los edificios construidos antes de 1979, carecían de cualquier tipo de aislamiento en las fachadas y las cubiertas, y del mismo modo se puede afirmar como habitualmente las ventanas disponían de un vidrio simple, con una carpintería que solía ser de madera y disponían de una persiana cuyo hueco en el interior del edificio se encontraba sin aislar por lo que en esta zona del edificio se creaban grandes pérdidas térmicas en la envolvente del mismo.

El 28 de Marzo de 2006 entra en vigor el actual **Código técnico de Edificación** (CTE [002]) que ha sufrido desde dicha fecha varias modificaciones especialmente en el documento dedicado al ahorro de energía, todo ello condicionado por las exigencias europeas de adaptación de las normas nacionales a las directrices comunitarias.

Desde la fecha de su aprobación, se ha llevado a cabo actualizaciones de dicho documento en 2007[029], 2008 [030], 2009 [031], 2010 [032 y 033], y 2013 [034 y 035] y el actual documento en vigor, que es de 15/06/2017 [036], disponiendo actualmente de un documento con comentarios del Ministerio de Fomento (versión 29 de junio de 2018). Muchas de estas modificaciones están haciendo que los requisitos que se solicitan de los edificios y sus envolventes sean cada vez más exigentes en materia de eficiencia energética de cara a reducir al máximo el consumo energético de los edificios, queriendo llegar a conseguir que los edificios sean de consumo casi nulo.

El 19 de enero de 2007 se aprueba el Real Decreto 47/2007 que define el procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción [037]. Que se transpone de la directiva 2002/91/CE por la que se establece la obligación de disponer de un certificado de eficiencia energética, para los compradores o usuarios de edificios de nueva construcción.

El de 5 de abril de 2013 se aprueba el Real Decreto 235/2013, que define el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios [038], que se refunde del Real Decreto 47/2007 y transpone la Directiva 2010/31/UE en lo relativo a la certificación energética incorporando el procedimiento para la certificación de la eficiencia energética de edificios existentes

En 2013 el Código técnico de la Edificación es actualizado, para transponer la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios incluyendo así los artículos 3, 4, 5, 6 y 7 de esa Directiva. Dicha actualización se materializa en el Documento Básico de Ahorro de energía (DB HE) que introduce una nueva sección, HE0, que es la encargada de establecer la limitación del consumo energético de los edificios

El 12 de febrero de 2016 se aprueba el Real Decreto 56/2016, que transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012 [039], relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía:

Mediante este Real Decreto se transpone la Directiva 2012/27/UE y se promociona y se impulsan un conjunto de actuaciones para contribuir al ahorro y la eficiencia de la energía primaria consumida

De esta evolución se observa como la tendencia es a realizar edificaciones que certifiquen unos consumos energéticos, cada vez más reducidos y ello pasa por disminuir el consumo de las instalaciones necesarias para poder llegar a unas condiciones de confort, pero también establecer una demanda de reducida de consumo energético asociada a una construcción que sea capaz de mantener los niveles de confort a pesar de las variaciones climáticas presentes en el exterior de los edificios y para ello la envolvente de los edificios juega un papel transcendental.

2.5.- LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO: FACHADAS DE DOBLE PIEL

La presente tesis doctoral se centra en el análisis y caracterización de las fachadas de doble piel, como tipología de construcción pasiva que permite mejorar las prestaciones del edificio tanto desde el punto de vista térmico y acústico como desde el punto de vista del confort de los usuarios, pero también con relación a las acciones que genera el viento sobre las fachadas de los edificios, o la estética que proyecta el edificio. Dicho análisis va a contemplar el comportamiento estructural de dichos elementos de la doble piel, que en este caso, van a ser elemento de chapa perforada resuelta en diferentes materiales como el acero o el aluminio. Esta tipología de fachadas también se realiza en otros materiales como el vidrio, aunque en este caso las características que aporta el material de revestimiento son diferentes, principalmente en el peso de la solución constructiva, pero también en la estanqueidad producida por el elemento externo. Como las chapas perforadas son elementos más ligeros, habitualmente las soluciones de apoyo con las fachadas del edificio se resuelven con soportes también metálicos. Por otro lado, la menor rigidez que presentan las chapas perforadas, generan una mayor deformación de dichas chapas y que habitualmente se reducen por medio de la disposición de marcos metálicos que sirven de soporte a las chapas. La presente investigación quiere mostrar como la realización de dobleces en los extremos de las chapas perforadas puede reducir la deformación de las mismas y con ello también el coste de la solución constructiva, al tratarse en muchos casos de chapas simplemente apoyadas en unas subestructuras de la envolvente.

Del mismo modo se plantea llevar a cabo un análisis de las mejoras que produce este tipo de soluciones en el comportamiento térmico y acústico del edificio con esta tipología de fachadas de doble piel. Por otro lado, se plantea el análisis del comportamiento fluido-dinámico, de la chapa perforada, de forma que mediante una serie de ensayos en un túnel de viento, se pueda observar el comportamiento de la chapa. Y por último se ha planteado la realización de un estudio social, a través de una encuesta realizada a una población de más de 100 personas, sobre la sensación que produce la disposición de un velo exterior al edificio, siempre desde el punto de vista del usuario del mismo, esto es teniendo en cuenta a las personas que se encuentran en el interior del edificio durante sus jornadas laborales.

Se puede comenzar este apartado teniendo en cuenta la definición del término: fachada de doble piel, que se define como *aquella que está constituida con dos sistemas o "pieles" separados por un espacio intermedio que se encuentra ventilado.*

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Este sistema de doble piel, con una cámara de aire intermedia, es de gran interés para poder mantener o crear un micro-clima alrededor del propio edificio, pues la doble fachada actúa como la ropa en las personas, regulando la temperatura exterior. El funcionamiento de esta doble piel en el edificio, permite **resguardarlo de** ciertos agentes exteriores, así el interior del edificio se encuentra más protegido de fenómenos como el **viento**, aunque principal protección es frente a la **radiación solar**. Aunque por otro lado, muchas veces se utiliza esta tipología constructiva para obtener una cierta estética en el edificio y también para crear sensaciones de movimiento.



Figura 2.21. Fachada del intercambiador de transportes. Tenerife.

La protección frente a la radiación solar, se plantea principalmente porque cuando dicha radiación solar, entra en contacto con la superficie de las fachadas del edificio, una parte de esta energía es absorbida en forma de calor hacia el interior de los edificios y por otro lado, la otra parte se refleja al entorno urbanizado, generando un mayor aporte de radiación y ello incidirá en un sobre calentamiento.

La parte de la energía que es absorbida por la envolvente del edificio, se transmite hacia el interior del mismo, esto influye en el material de cerramiento que hay que disponer en el edificio para tratar de reducir al máximo dicha transmisión de calor principalmente en épocas de verano ya que se produciría un recalentamiento en el ambiente interior. Este fenómeno tiene una mayor incidencia en aquellas zonas del país que presentan una mayor radiación solar y esta es una de las principales razones por las cuales este tipo de fachadas de doble piel, son más utilizadas en áreas de mayor exposición solar y climas cálidos, donde se recomienda utilizarlos principalmente en las fachadas con orientación sur que son las que reciben una mayor incidencia solar [040].

Otros dos factores muy importantes a tener en cuenta, en relación a la absorción de la radiación solar, por parte de la envolvente del edificio, son la “reflectancia”, que se puede definir como la reflexión de los rayos infrarrojos que no son absorbidos por parte del material y por lo tanto, no se transmite ese calor hacia el interior del edificio. Y por otro lado, está el parámetro de la “emisividad”, que se puede definir como la capacidad para eliminar el calor, este parámetro es función principalmente del material. Haciendo un símil con el comportamiento eléctrico, hay materiales que conducen mejor que otros la electricidad, y esto mismo ocurre también con los materiales y el calor [041].

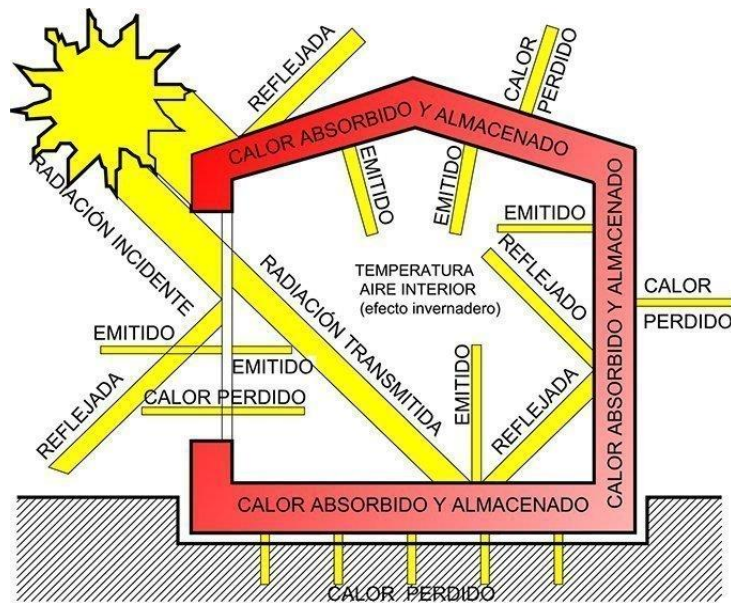


Figura 2.22. Radiación solar, parte incidente y reflejada.

Con relación al comportamiento de la doble piel frente a las acciones dinámicas como el viento, existen estudios que demuestran que presenta un efecto beneficioso en la aplicación de las cargas debidas a la acción del viento. Esto es debido a que dichas acciones se ven reducidas, tal y como se muestra en su investigación Gang Hu et al, [042] que llevan a cabo un estudio, donde se analiza el comportamiento frente al viento en edificios de gran altura. En dicho estudio se muestra la disposición de una fachada de doble piel en un edificio en altura y con diferentes configuraciones de la misma, esto es se plantea un cerramiento completo de la fachada y con diferentes aberturas, tanto horizontales como verticales.

Las simulaciones realizadas que han sido contrastadas con una campaña de ensayos realizados en una serie de maquetas en el interior de un túnel de viento, demuestran que cuando la fachada de doble piel cierra completamente el perímetro del edificio, se produce un incremento en el comportamiento tanto a presión, como a succión, en sus valores medios frente a la presión del viento. Por el contrario, cuando la doble piel presenta una serie de aberturas verticales, es cuando se han obtenido en las simulaciones realizadas, y contrastadas con los ensayos realizados, la capacidad de producir una reducción eficaz de la presión del viento sobre los revestimientos del edificio.

La actual normativa en vigor, el Código Técnico de la Edificación, recoge en su Documento Básico Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación DB-SE-AE, las acciones producidas por la nieve, el viento, las acciones térmicas y la sobrecarga por uso. En el caso de las fachadas de doble piel, la principal acción a tener en cuenta, es la acción del viento sobre esta parte de la envolvente de los edificios [043].

Las presiones que ejerce el viento, en este caso sobre las chapas perforadas, se manifiestan en esfuerzos resultantes que dependen tanto de la forma o geometría, la dimensión y las características de las mismas, pero también de las características de la acción del viento como es la dirección, intensidad y racheo e incluso de las características del propio entorno en el que

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

se ubica el edificio. El cálculo de las acciones del viento en el edificio, debe llevar a cabo la comprobación del mismo en todas las direcciones del edificio, considerándose siempre la acción del viento en los dos sentidos (presión y succión).

La acción del viento sobre las fachadas genera tanto fuerzas tangenciales como perpendiculares, siendo estas últimas las que tienen un mayor efecto sobre los elementos de la envolvente. Las primeras (fuerzas tangenciales) se calculan como el producto de la presión exterior por un coeficiente de rozamiento, que tiene un valor de 0,01 en el caso de que la superficie sea muy lisa, aumenta a un valor de 0,02 si la superficie es rugosa y se duplica hasta 0,04 cuando la superficie es muy rugosa. En el caso, de las fachadas de chapa perforada al igual que otros materiales como el vidrio, utilizados en la construcción de fachadas de doble piel, se corresponde con un valor de 0,01, debido a que se trata de materiales muy lisos.

En cuanto al segundo tipo de fuerzas, (las fuerzas perpendiculares a la superficie) son las que producen un mayor efecto sobre las chapas, y para ello el CTE, establece una fórmula en la que se obtiene la presión sobre el edificio, como el producto de la presión dinámica del viento por dos coeficientes:

$$q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p$$

Siendo:

q_b : Presión dinámica del viento.

C_e : Coeficiente de exposición.

C_p : Coeficiente eólico o de presión.

Presión dinámica q_b : corresponde con el valor básico de la presión dinámica del viento, que depende de la densidad del aire ($\delta = 1,25 \text{ kg/m}^3$) y de la velocidad del viento (V_b), se puede tomar como valor medio para el territorio español el valor de 0,5, aunque en el anejo D del CTE-AE, se obtienen valores más precisos en función del ámbito geográfico.

$$q_b = 0,50 \cdot \delta \cdot V_b^2$$

El valor básico de la velocidad del viento, depende de la zona geográfica, y en el caso de España se distinguen tres zonas, la zona A presenta una velocidad de 26 m/s, zona B con 27 m/s y zona C con 29 m/s.

De este modo, se obtienen tres valores de la presión dinámica para cada una de las zonas, que se corresponde con $0,42 \text{ kN/m}^2$ para la zona A, $0,45 \text{ kN/m}^2$ para la zona B y $0,52 \text{ kN/m}^2$ para la zona C. En la figura 2.23, se muestran las diferentes zonas de aplicación de la presión dinámica.

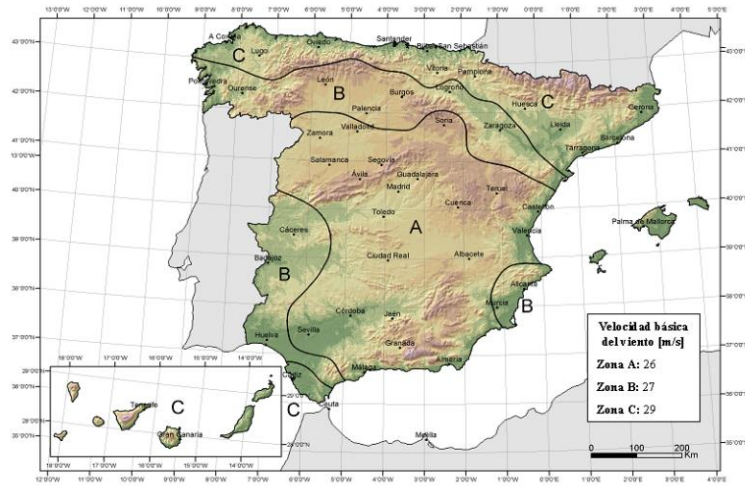


Figura 2.23. Distribución de la presión dinámica por zonas.

Coefficiente de exposición, C_e : coeficiente que tiene en cuenta los efectos de las turbulencias originadas tanto por el relieve del entorno, como por la topografía del terreno. Indica el grado de aspereza del ambiente en el que se encuentra.

$$C_e = F * (F + 7 * k)$$

Siendo:

$$F: k * \ln (\max (z,Z) / L).$$

Siendo k , L , y Z parámetros característicos de cada tipo de terreno, en función del grado de aspereza del entorno que se presenta en la tabla 2.1.

	Grado de aspereza del entorno	Parámetro		
		k	L (m)	Z (m)
I	Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,156	0,003	1,0
II	Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III	Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV	Zona urbana en general, industrial o forestal	0,22	0,3	5,0
V	Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	0,24	1,0	10,0

Tabla 2.1. Coeficientes para cada tipo de entorno.

Coefficiente eólico o de presión, C_p : coeficiente que analiza el comportamiento según la forma y la orientación de la superficie respecto al viento y en su caso de la situación del punto respecto a los bordes de la superficie, de forma que los valores negativos significan succión, y los positivos presión. Este coeficiente depende de la tipología de edificio, y se distinguen entre edificios de pisos, y edificios industriales.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coefficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coefficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Tabla 2.2. Coeficientes eólico en edificios de pisos.

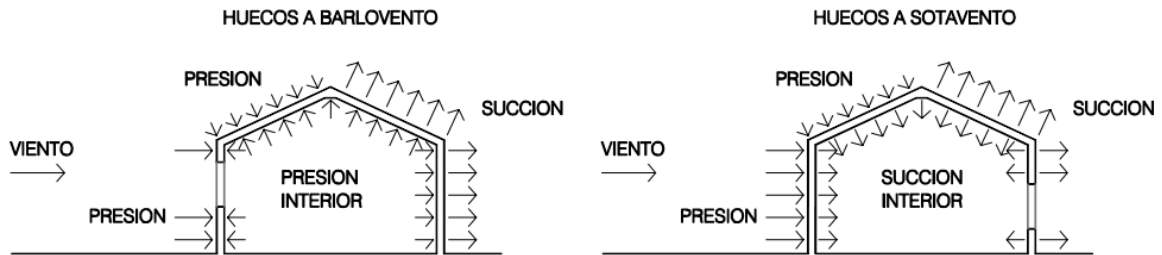


Figura 2.24. Presiones ejercidas por el viento en una construcción diáfana.

El viento genera una acción de presión o succión sobre la doble piel de la envolvente, que en este caso se trata de un material poroso, ya que la chapa presenta un grado de perforación que en algunos casos supone una parte importante de la superficie de la chapa (normalmente se encuentra comprendido entre un 30 y un 50%). De esta forma, el viento presiona sobre la chapa pero el aire puede atravesar la misma a través de los agujeros presentes en la misma. Este efecto, genera una sobrepresión en los bordes de los agujeros de la chapa, y el aire que la atraviesa pasará a gran velocidad, pero se produce una enorme caída de presión a su paso, lo que hace que la presión que finalmente llega a la fachada en su piel interior sea más reducida que la que se plantea en el cálculo según la normativa.

Es un comportamiento similar al que produce un diafragma en una conducción hidráulica, que está formado igualmente por un patrón de agujeros dispuesto en el flujo de una conducción, se diseñan para crear una caída de presión determinada en un circuito hidráulico.

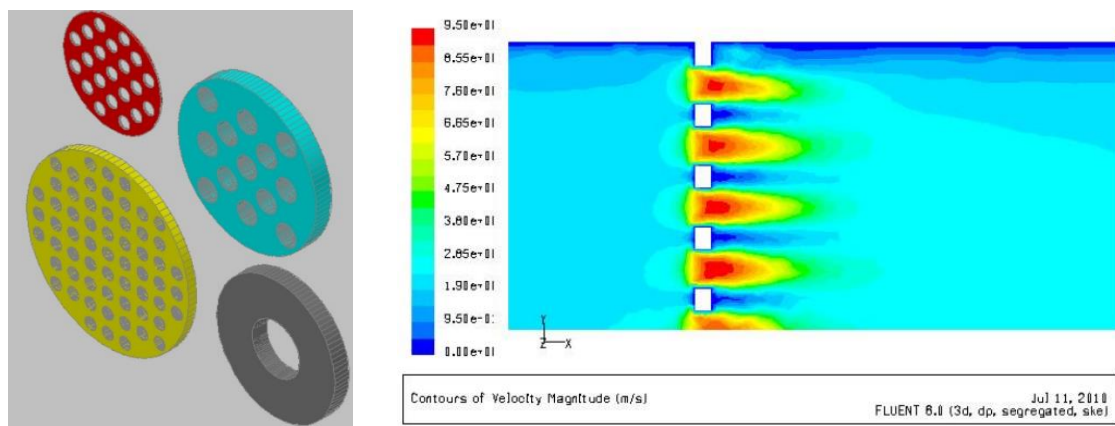


Figura 2.25. Diafragmas multi-orificio utilizados con conducciones hidráulicas.

Estos elementos multi-orificio generan una reducción de la fluctuación del flujo debido a la división de la energía en los múltiples chorros, reduciéndose la amplitud de la turbulencia inducida en cada uno de ellos. Y se encargan de reducir la disipación de energía aguas abajo en un tramo correspondiente a dos o tres veces el diámetro de la conducción, mientras si se realiza por medio de un único agujero esa distancia aumenta a cinco o más veces el diámetro

El **análisis dimensional** es un método matemático que permite verificar ecuaciones y planificar ensayos. Para ello es necesario obtener una serie de grupos adimensionales, que permitirían utilizar los resultados experimentales que han sido obtenidos en unas condiciones determinadas, y llevarlos a nuevas situaciones en que los datos de partida no sean iguales, esto es que presenten diferentes dimensiones geométricas, cinemáticas o dinámicas, así como en aquellos casos en los que las propiedades del fluido sean distintas de las utilizadas durante los ensayos.

La ventaja de la utilización del análisis dimensional viene dada en aquellos casos en los que sea muy difícil de establecer las ecuaciones en determinados flujos, o bien la dificultad de resolver dichas ecuaciones, siendo imposible obtener relaciones empíricas y teniendo que recurrir al método experimental.

Hay que tener en cuenta, que si en un experimento se utiliza un modelo, definido por una escala geométrica del prototipo, se pueden obtener las escalas cinemáticas (también denominadas relaciones de velocidades) y las escalas dinámicas (relaciones de fuerzas). En este caso los resultados adimensionales que se obtienen para dicho modelo son también válidos para el prototipo.

El análisis dimensional es por lo tanto, capaz de reducir el número de variables de estudio en un problema complejo, simplificando los resultados obtenidos. En el caso que nos ocupa, el uso de esta metodología es muy útil ya que permite el estudio de las chapas perforadas a una escala reducida, tomando muestras a escala y realizando ensayos sobre las mismas para poder seguidamente, extrapolar los datos experimentales bajo condiciones de semejanza.

En el caso de la Mecánica de Fluidos los principales grupos adimensionales utilizados son los siguientes [044]:

- Número de **Strouhal**: es un número adimensional que describe los mecanismos de flujo oscilante, se utiliza en metrología, específicamente en medidores de turbina de flujo axial.
- Número de **Froude**: es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido; en canales abiertos nos informa del estado del flujo hidráulico.
- Número de **Mach**: es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto; normalmente usado para describir la velocidad de los aviones, la importancia del número de Mach reside en su relación con la compresibilidad de un gas; cuando este número es menor de 0,3 se considera fluido incompresible en el estudio de aerodinámica y modelos con aire o gases.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

-Número de **Reynolds**: se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo. Dicho número aparece relacionado con el hecho de que el flujo se pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande) se utiliza en el diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

-Número de **Euler**: Expresa la relación entre la energía asociada a una pérdida de presión por unidad de volumen respecto a la energía cinética por unidad de volumen del flujo. Se usa para caracterizar pérdidas de carga en el flujo, que será menor cuanto menos pérdida haya.

Las condiciones de semejanza, que relacionan modelo con prototipo, es necesario que entre ambos (modelo y objeto real) exista una semejanza de carácter geométrico, cinemático y dinámico [045].

La **semejanza geométrica**, implica que dos fenómenos son geoméricamente semejantes si todas las dimensiones lineales que las definen son proporcionales. Estos criterios de semejanza geométrica son relaciones entre cualquiera de las dimensiones lineales de ambos fenómenos.

La **semejanza cinemática** entre dos fenómenos, se da si con la semejanza geométrica, se tiene al mismo tiempo, una proporcionalidad y orientación de los vectores de velocidad en todos los puntos. Los criterios de semejanza cinemática son ángulos que determinan la posición de un cuerpo respecto al vector velocidad de la corriente libre.

La **semejanza dinámica** de dos fenómenos, se produce si con la semejanza cinemática tiene lugar la proporcionalidad y orientación de los vectores de fuerzas en todos los puntos adecuados de dichos fenómenos.

Hay que tener en cuenta que en los problemas reales son muy complicados en conseguir una semejanza perfecta, por ello se habla de pseudo-semejanza. Donde esta pseudo-semejanza se ha debido a la imposibilidad de mantener todos los parámetros adimensionales iguales, por lo que se debe de realizar una selección de aquellos parámetros que son más relevantes. Los números más adecuados a considerar en el problema que se está abordando son el número de Mach y número de Reynolds que constituyen los criterios de validación en las pruebas con los modelos a escala que se van a utilizar en la caracterización de la solución de fachada de doble piel formada por una chapa perforada exterior [046].

El **número de Reynolds (Re)** es un número adimensional permite caracterizar la naturaleza del flujo, de forma que lo divide entre laminar, transicional o turbulento. Dependiendo de las propiedades del fluido y de las dimensiones del flujo. Al aumentar el flujo másico aumentan las fuerzas de inercia que son contrarrestadas por la fricción, o por las fuerzas viscosas del fluido. Es por ello, que el número de Reynolds se calcula de la siguiente manera.

En la realización de los ensayos a escala, se pueden correlacionar con los elementos reales, en el caso de las chapas perforadas se calcula el número de Reynolds con la siguiente equivalencia:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{D_h \cdot v}{\nu}$$

Siendo:

D_h: Diámetro hidráulico, en este caso hay que tener en cuenta el tipo de conducto disponible en el túnel de viento para proporcionar la sección de paso, donde se ha ubicado la muestra a ensayar. Como en este caso, no se trata de un conducto circular, el cálculo del diámetro equivalente viene dado por la expresión: $D_h = (4 \cdot A)/P$, siendo A el área de la sección de la zona de ensayos y P el perímetro de la misma ambas dimensiones medidas en metros.

v: Es la velocidad del viento a la entrada de la cámara de ensayos, su medición se lleva a cabo mediante un sensor dispuesto en la entrada y que va tomando dicha medición de forma continua en m/s.

ν: Este parámetro es la viscosidad dinámica del aire a una temperatura de 20°C, en m²/s.

En función de donde se calcule el número de Reynolds, sus valores límite pueden pasar de un régimen a otro (laminar a turbulento y al revés), pudiendo variar de la siguiente forma:

Flujo generado en el interior de una conducción de sección circular:

- Flujo laminar $Re < 2300$
- Zona de transición $2300 < Re < 4000$
- Flujo turbulento $Re > 4000$

Flujo interno producido entre dos placas planas:

- Flujo turbulento $Re \geq 1400$

Flujo externo que se produce alrededor de un obstáculo:

- Flujo turbulento $Re \geq 2 \cdot 10^4$

Flujo externo producido a lo largo de una superficie:

- Flujo turbulento $Re \geq 5 \cdot 10^5$

En la figura 2.26 se puede observar cómo se lleva a cabo la evolución de la trayectoria de un fluido desde el estado laminar hasta un estado turbulento [047].

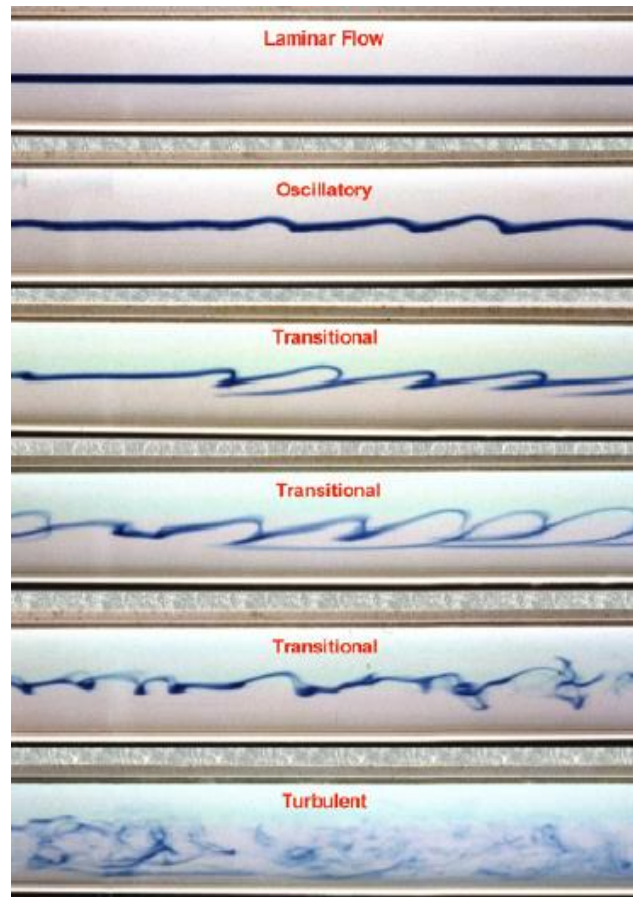


Figura 2.26. Evolución del régimen laminar a turbulento.

Se define como **flujo laminar**, aquel en el que el fluido se va desplazando en láminas, con un movimiento suave de unas capas sobre otras. En este caso, las fuerzas viscosas son las que tienen un efecto predominante, disminuyendo cualquier inestabilidad, o posible turbulencia. Es por ello, que cuanto mayores son las fuerzas viscosas, más se encuentra el fluido en un régimen de carácter laminar.

Como se observa en la figura 2.27, el perfil de velocidades que se obtiene en el régimen laminar tiene forma parabólica, de modo que la velocidad media del fluido es aproximadamente la mitad de la velocidad máxima, que en este caso, se encuentra en el centro de la conducción.

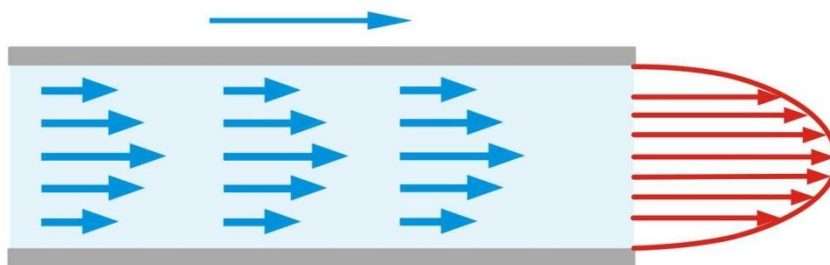


Figura 2.27. Perfil de velocidades en régimen laminar.

Se define como **flujo turbulento**, aquel que tiene un intercambio elevado de moléculas entre las distintas capas, al contrario que lo que ocurre en el régimen laminar. En este caso el

movimiento de las partículas es muy inestable y desordenado, donde las partículas se mueven siguiendo trayectorias desordenadas y formando torbellinos. Se puede observar como a medida que aumenta la velocidad del flujo, también aumenta el número de Reynolds, y por tanto, la tendencia al desorden también aumenta. Y de esta forma, ninguna capa de fluido avanza más rápido que las otras.

En este caso, tal y como se puede observar en la figura 2.28, el perfil de velocidades en el flujo turbulento es prácticamente plano, siendo aproximadamente la velocidad media, del orden de 0,8 veces la velocidad máxima.

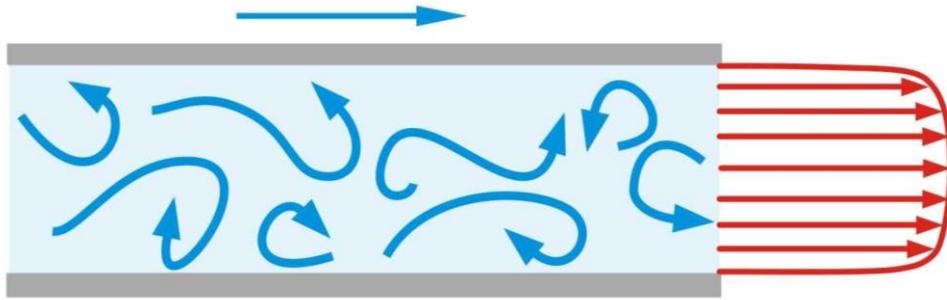


Figura 2.28. Perfil de velocidades en régimen turbulento.

El fenómeno de la turbulencia es más complejo que la laminaridad, y se produce en un gran rango de escalas teniendo como resultado la disipación de una gran cantidad de energía.

Las principales propiedades que presenta la turbulencia se pueden definir como:

- La vorticidad, que se encuentra relacionada con la formación de los torbellinos en diferentes escalas.
- La disipación, que cuando se genera un movimiento turbulento es capaz de autoabastecerse de energía, al poder extraerla del flujo principal.
- La fluctuación, se producen inestabilidades de una forma caótica.
- La tridimensionalidad, se produce sobretodo en escalas pequeñas.

Otra aplicación de este tipo de movimientos de flujo, se produce en un lugar donde hay un fenómeno similar al de nuestra envolvente de chapa perforada sometida a la acción del viento, se da en los sistemas de ventilación de las salas blancas. Este tipo de locales, se encuentran reservados para aplicaciones que requieren unas condiciones ambientales de trabajo específicas y normalmente muy diferentes al resto, como pueden ser laboratorios, donde se lleva a cabo un estricto control del aire presente en el mismo. En este tipo de locales, se suelen utilizar los sistemas de ventilación denominados de **flujo unidireccional**, o también denominados de **flujo laminar**, que son instalaciones especialmente diseñadas y construidas para la protección ambiental de procesos críticos, mediante la creación de un flujo de aire de carácter "**unidireccional**".

La Normativa en vigor de las salas blancas definen el movimiento del aire en las mismas, como una serie de flujos de aire controlado en líneas de corriente que van en una única dirección, de forma que todas las capas del aire impulsado son casi paralelas y llevan una velocidad uniforme a través de la sección transversal completa de la zona de trabajo presente en la Sala Blanca. La función principal de estos sistemas de ventilación, consiste en llevar a cabo la protección tanto de los trabajadores, de los productos o de los procesos que se desarrollen en

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

dichos espacios y que pueden verse contaminados por las impurezas presentes o generadas en el espacio donde se desarrolla la actividad, por ello el aire de la estancia se dirige de una zona a otra, en un régimen laminar.

La normativa de las empresas farmacéuticas cGMP EUGMP [048], o de la organización mundial de la salud WHO, o de la agencia europea de los medicamentos EMEA, indican como las velocidades más adecuadas para la protección de estos espacios oscilan entre los 0,36m/s y 0,52m/s (0,45m/s \pm 20%) y lo definen como “Flujo Unidireccional”. Y en el caso de la norma ISO (14644-4) dedicada a las Salas limpias y locales anexos controlados: Parte 4, Diseño y construcción y puesta en servicio [049], se establece el concepto de “Transporte dirigido” como el flujo unidireccional del aire, e indica como el valor promedio de la velocidad debe ser ligeramente superior a 0,2m/s.

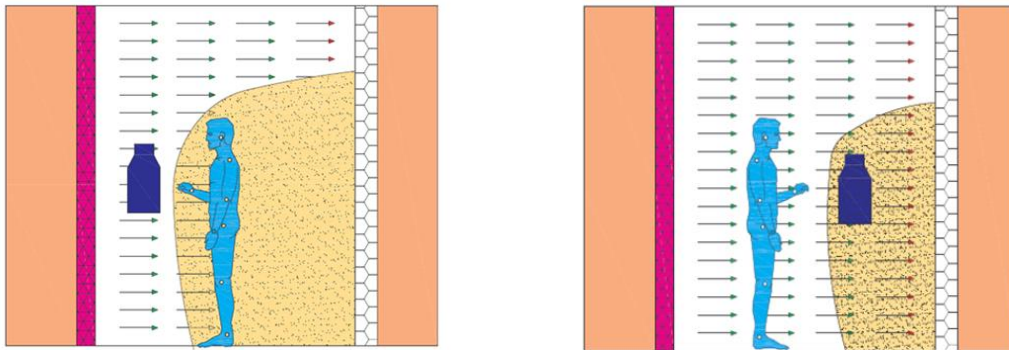


Figura 2.29. flujo laminar en sala blanca para proteger el material o al operario.

Constructivamente los flujos unidireccionales/laminares se componen de una unidad de impulsión de aire (ventilador) que deberá poder regularse, una zona de distribución de aire, un sistema de filtración absoluta HEPA, junto con un sistema de difusión de aire, y un indicador de diferencia de presión, siendo estas pantallas difusoras de aire las encargadas de uniformizar el flujo de aire regularizando y homogeneizando la velocidad. Este tipo de pantallas puede ser de varios tipos, entre ellos habitualmente se utiliza una lámina metálica microperforada que consiste en una lámina metálica de acero, acero inoxidable o aluminio con perforaciones de diámetro inferior o igual a 1mm.

Con relación al **Número de Mach**, se trata de un número adimensional, que se encarga de relacionar la velocidad local del flujo, v , con la velocidad local del sonido dentro del fluido en el que se encuentra, c , de forma que se puede obtener mediante la siguiente expresión [046]:

$$Ma = \frac{v}{c}$$

Este número permite analizar los efectos de la compresibilidad en el flujo. En el sentido de las fuerzas, se corresponde con la relación existente entre las fuerzas inerciales y las originadas por la compresibilidad del fluido. De esta forma, el número de Mach, permite dividir el flujo en cinco regímenes diferentes, con las siguientes denominaciones:

Régimen incompresible: $Ma < 0,3$. En este caso, los efectos de compresibilidad se consideran generalmente insignificantes.

Régimen subsónico: $0,3 < Ma < 1$. Se trata de un régimen similar al incompresible. En este caso, la velocidad de la corriente es inferior a la velocidad de propagación de las perturbaciones, es decir, a la velocidad del sonido.

Régimen transónico: $0,8 < Ma < 1,2$. En este tramo del número de Mach, se producen fuerzas fluctuantes, lo que dificulta su estudio.

Régimen supersónico: $Ma > 1$. Se caracteriza por la existencia de ondas de choque y de expansión y en este caso, la velocidad de la corriente es superior a la del sonido.

Régimen hipersónico: $Ma \gg 1$. A velocidades muy altas, se producen reacciones químicas en el aire, como la disociación de las moléculas de O_2 y N_2 por las altas temperaturas asociadas.

En este sentido, y recordando que la velocidad del sonido es de 340 m/s, siendo la velocidad del flujo en el túnel de viento que se va a utilizar para la realización de los ensayos, en la entrada de la sección de ensayos, de un valor que está comprendido entre los 2 y los 6 m/s, se puede decir que en el caso más desfavorable, el número de Mach tendría un valor de 0,02:

$$Ma = \frac{v}{c} = \frac{6 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} = 0,02$$

De forma que el número de Mach, al no superará el valor máximo de 0,02, quiere decir que los ensayos que se han realizado, se encuentran dentro de un régimen de fluido incompresible.

Otra ventaja que se produce con el uso de las fachadas de doble piel, **es el incremento o mejora de la ventilación natural** en el edificio, al generarse en esta doble piel, un efecto chimenea y ello puede conllevar una disminución en el uso de la ventilación forzada, disminuyendo con ello el consumo de energía del edificio, y reduciendo con ello, el riesgo de aparición del denominado síndrome de edificio enfermo.

Ya en 1982 la Organización Mundial de la Salud (OMS) [050] realizó una definición del concepto de edificio enfermo como "*el conjunto de molestias ocasionadas por la mala ventilación, la descompensación térmica, las cargas electromagnéticas y las partículas y vapores de origen químico en suspensión que circulan por el edificio en el que vivimos o trabajamos*". A pesar del tiempo que ha pasado, y aunque existen nuevas normativas para tratar de evitar esta problemática, se siguen conociendo casos de nueva construcción y rehabilitaciones de edificios llevadas a cabo, donde aparecen síntomas entre sus usuarios de esta problemática. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que este síndrome afecta a un 30% de los edificios modernos y a entre el 10 y el 30% de sus ocupantes. Con respecto a estos últimos, se encuentran por un lado, los que ya tenían enfermedades como alergias, asma, y dermatitis atópica, que experimentan síntomas que se agravan por la exposición a alérgenos y por las condiciones ambientales presentes en el interior de estos edificios. Por otro lado, se encuentran las personas que sufren enfermedades específicas, que son producidas por causas específicas del propio edificio.

En España existen varios ejemplos de edificios enfermos que se han dado en edificaciones singulares en la última década, como es el caso de la Torre Agbar ubicada en Barcelona, icono de la arquitectura moderna, con más de 30.000 m² que albergan oficinas y donde en el año 2007, se identificaron varios casos de lipoatrofia semicircular. Durante este mismo año y muy

cerca de allí también en Barcelona, el edificio de la sede central de la compañía Gas Natural fue desalojado ante la detección de varios casos también de lipoatrofia entre sus trabajadores. En este caso, esa dolencia se relacionó con la electricidad estática que se creaba debajo de las mesas de los más de 1000 trabajadores presentes en el edificio, entre otros factores.

En relación a la eficiencia energética de los edificios, las fachadas de doble piel permiten disminuir las ganancias solares en verano, por la incorporación de una solución de protección solar, resulta que a través de las chapas perforadas, se permite disponer de una protección pasiva, frente a la radiación solar, disponiendo a su vez de un espacio intermedio entre la fachada del edificio, con un elevado grado de ventilación. En este sentido, Abdultawab [051] llevo a cabo su investigación sobre el uso de las fachadas de doble piel en climas tropicales. En estos Países existe habitualmente una gran exposición a la radiación solar y es también de gran importancia tratar de reducir al máximo el soleamiento, ya que es la principal causa del aumento de temperatura en los edificios. En estos Países, también se puede observar como la diferencia entre la temperatura interior de los edificios y la exterior de la calle, es muy pequeña, y por ello, en estos casos la incidencia de la radiación solar tiene un enorme impacto en la temperatura del aire en el interior de los edificios.

Por otro lado Blanco et al [025] en su investigación realizada sobre este tipo de fachadas de doble piel formada mediante una envolvente de chapas perforadas, muestra la influencia de los materiales y colores utilizados en la envolvente exterior, de forma que las muestras de acero galvanizado se calientan en torno a 4 o 5°C más que las muestras de aluminio anodizado. También el tratamiento de color influye en la temperatura de las chapas, así los colores más oscuros como el negro, presentan temperaturas entre 6 y 8 °C más que las chapas de colores más claros. Y con relación al grado de perforación de las chapas, así se ha podido observar como en las soluciones de cerramientos de chapa sin perforar, existen diferencias de temperaturas entre la cara interior y exterior de la misma del orden de los 20 °C en el caso de las chapas con perforaciones se reducen a la mitad, siendo del orden de 10 °C. Estas chapas dispuestas en el exterior de un edificio próximo a Bilbao alcanzaron 45 °C en el caso de chapas sin perforación y de 30 °C en el caso de las chapas perforadas.

También Blanco et al [040] lleva a cabo una comparativa de un edificio en 2 ubicaciones con diferentes condiciones climáticas como son Bilbao y Sevilla, con soluciones de envolvente de chapa perforada con diferentes porcentajes de área abierta. En el caso de Bilbao que se encuentra en la zona climática I del CTE, y con un grado de perforación del 40%, se producen unos ahorros en los consumos de calefacción y climatización del orden del 22% en el caso de utilizar un vidrio simple y del 16% con un doble vidrio. Para el caso de la ubicación de Sevilla en la zona climática V, los mayores ahorros coinciden con porcentajes de área abierta menores, ya que en este caso el porcentaje óptimo del 25%, obteniendo unos ahorros del 53% en el caso de una fachada con un vidrio simple y del 49% cuando el vidrio es doble.

También se analizan en este artículo, la influencia del color de las chapas en la captación de la radiación solar. Se define como los colores de las chapas más oscuros (negro) reflejan solamente un 5% de la radiación solar, por lo tanto su temperatura se puede incrementar hasta los 80°C, cerca de un 5% del calor se transmite hacia el interior del edificio y del 90% del calor aumenta la temperatura del aire en los alrededores del edificio.

Por otro lado cuando se utilizan colores claros (blanco), la reflexión de la radiación pasa a ser del 80% y de esta forma la temperatura de la superficie de la chapa puede alcanzar los 44°C,

siendo en este caso, el valor del calor que se transmite hacia el edificio de un 1,5% y del 18% el que se trasmite al aire circundante al edificio.

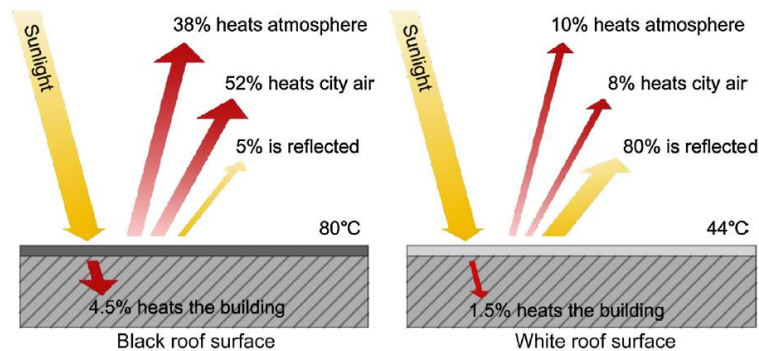


Figura 2.30. Respuesta a la radiación solar de una superficie negra y blanca (37°C Temp aire) [041].

También Blanco et al [052] en su continuación sobre la investigación realizada sobre este tipo de fachadas, muestra como el porcentaje de la minoración del aporte energético solar producido por el sol por la presencia de la chapa perforada con perforaciones R5 T7 y de 1 mm de espesor para cualquier ciudad Europea y sea cual sea la orientación de fachada del edificio permite reducir entre los valores del 75.5% al 79% de la radiación solar.

Según se baja en la latitud de las ciudades analizadas, se observa como la minoración va en aumento por causa de la mayor inclinación del sol respecto al plano horizontal y la cantidad de sombra producida por el espesor de la chapa utilizada en la envolvente.

Si se modifica la orientación de la fachada, el punto máximo de minoración se encuentra en la orientación "Sur". Los puntos de inflexión máximos se encuentran en las direcciones Norte, Sur y Oeste. Los puntos de inflexión mínimos se encuentran hacia el Sureste y Suroeste, y en menor intensidad hacia el Noroeste.

La mayor parte de los estudios realizados, muestran las ventajas del comportamiento de las fachadas de chapa perforada en zonas más calurosas donde existe una gran radiación, y la chapa se muestra como un elemento protector, que impide que esa radiación llegue al interior del edificio [053]. Pero su funcionamiento en el caso de las estaciones más frías, esta doble piel, permite captar la radiación solar y debido al uso de soluciones de chapa en acero o aluminio (ambos metales y buenos conductores) hace que la fachada de doble piel, actúe como un colector solar, capta esa radiación y la trasmite muy rápidamente por toda la superficie metálica, generando un espacio intermedio en la cámara de aire, con temperaturas más altas que las presentes en el exterior, y ello ayuda a generar una reducción de las pérdidas de calor interiores y contribuir al ahorro energético de los edificios.

Del mismo modo, la fachada de doble piel mejora las condiciones de confort presentes en proximidad de las hojas que componen la fachada, al evitar el efecto de pared fría, o pared caliente que se da en el interior de los edificios.

La disposición de esta doble piel genera también una **mejora del comportamiento acústico de las edificaciones**, al crear un nuevo obstáculo frente a la transmisión de las ondas acústicas que provienen del ruido aéreo generado principalmente por el tráfico rodado de las calles,

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

aunque en algunas zonas próximas a los aeropuertos también se puede utilizar en la reducción del ruido aéreo generado por los aviones y de esta forma, se permite mejorar las condiciones acústicas en el interior de los edificios.

Tal y como muestra Urbán et al [054] en su investigación, tras la realización de una campaña de ensayos in situ, ha podido demostrar como el aislamiento acústico de las fachadas de doble piel se ve afectado sustancialmente por las dimensiones de los huecos de ventilación y las resonancias acústicas que se producen en el hueco existente entre ambas pieles. En la investigación realizada se muestra una comparativa realizada en la que se utiliza un cierre de un solo vidrio (ventana), y una fachada de doble piel con una ventana exterior con ranuras abiertas que producen una reducción del ruido en un valor R_w de entre 5 y 7 dB. En este mismo estudio se demuestra como el aumento de la anchura de la cavidad de la fachada de doble piel tiene un impacto positivo en el aislamiento acústico de la fachada, porque el aislamiento producido en la cavidad cambia a frecuencias más bajas, que son menos audibles. El uso de una distribución adecuada de las rejillas de ventilación (suficientemente separadas) en combinación con el material absorbente puede producir un aislamiento acústico sustancialmente mayor. Esta mejora del aislamiento acústico se da principalmente, por debajo de la frecuencia de 1000 Hz, que es el caso en el que se encuentra principalmente el ruido aéreo generado por el tráfico rodado.

Por su parte Salikuddin, M. [055] muestra las características acústicas que presentan las chapas perforadas con el paso del flujo en entornos de ruido de alta intensidad, e indica como la resistencia acústica aumenta con la velocidad de las partículas.

La impedancia acústica es la relación entre la densidad del medio y la capacidad de transmisión de las ondas sonoras. Y se observa como a medida que se incrementa la porosidad de la chapa el valor de dicha impedancia acústica se reduce.

Deepak C. et al [056], lleva a cabo una caracterización acústica de una serie de paneles de nido de abeja, en los cuales se ha realizado una micro-perforación, en una de sus caras para comprobar el comportamiento acústico de las mismas, teniendo en cuenta varias variables como son el tamaño de los agujeros realizados y también la forma de los mismos.

En este estudio se muestra como si se reduce el tamaño del agujero, se incrementa la amplitud del coeficiente de absorción. Se genera un efecto viscoso de forma que cuanto más pequeño es el agujero, se transforma en una mayor amplitud de la absorción.

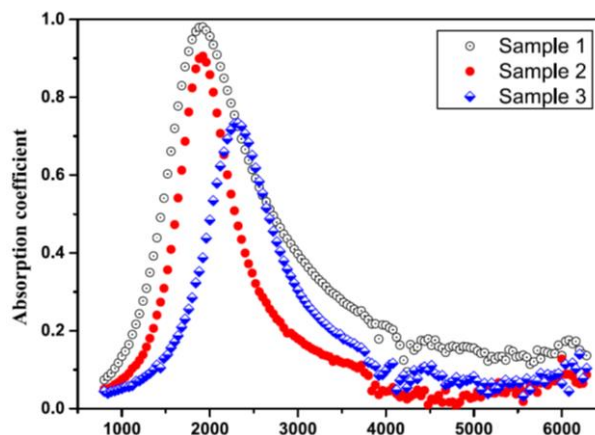


Figura 2.31. Coeficiente de absorción con diferentes tamaños de agujeros [056].

Y con relación a la geometría del agujero se ha realizado un estudio de 3 tipos de geometrías, triangular, cuadrada y circular. Y se ha observado también como siendo todas ellas con una sección equivalente, la forma triangular presenta el coeficiente de absorción más alto en la frecuencia más baja, después se encuentra la sección circular y por último la sección cuadrada.

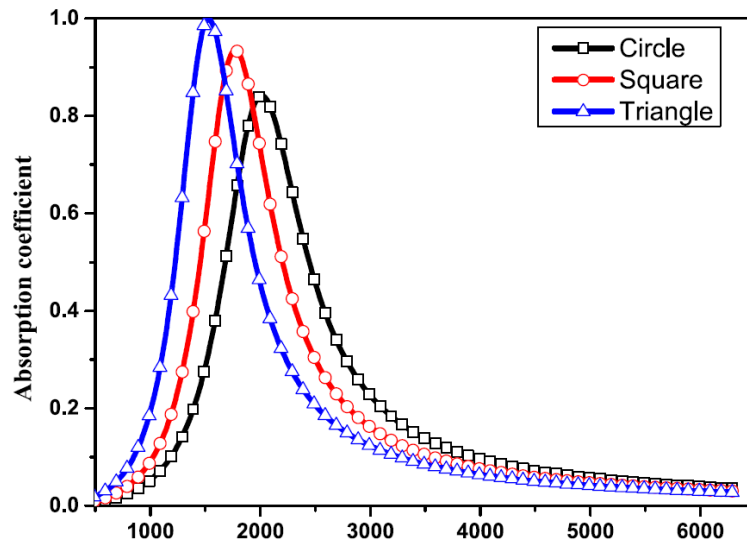


Figura 2.32. Coeficiente de absorción con diferentes formas de agujeros [056].

Según la investigación de Jaewan J. [057] muestra los resultados de varios estudios que afirman como las estrategias de ventilación natural pueden contribuir a mejorar la calidad del aire interior y el confort térmico; sin embargo plantea problemas asociados al ruido correspondiente al tráfico urbano. Muestra el desafío significativo de la protección de los edificios contra el ruido, ya que los entornos urbanizados conducen a la degradación de la calidad acústica en los edificios. Como solución para satisfacer las dos necesidades, los beneficios de la ventilación natural y reducción del ruido muestra el uso en su estudio a través de las características de una fachada de doble piel. Otros estudios demostraron que las aberturas de ventilación de las fachadas de doble piel, permitían una disminución en el ruido aéreo, por medio de las cavidades de aire presentes en la fachada de doble piel, porque la onda de ruido presente en el aire, se va transmitiendo a través de aberturas de ventilación y viaja tanto horizontal como verticalmente. La simulación del comportamiento acústico de la fachada de doble piel, se realiza mediante el programa SoundFlow. En este caso la fachada de doble piel se encuentra resuelta mediante dos vidrios que disponen de un hueco intermedio, que se encuentra dividido por una partición interior que sirve de soporte de la lámina exterior, y que también se encuentra resuelta en láminas de vidrio. En este caso concreto, se encontró que cuanto, más gruesas son las aletas de vidrio verticales de separación en la cavidad interior, mayores son los valores de pérdida de transmisión de sonido.

Jukka Keränen et al [058] muestra por su parte, en su investigación sobre un conjunto de 26 soluciones constructivas de diferentes fachadas realizadas en el País escandinavo (Finlandia), donde han llevado a cabo mediciones in-situ del aislamiento acústico en un amplio rango de frecuencias, de cara a evaluar el nivel de ruido ambiental dentro de las viviendas y que permite generalizar por su amplia muestra, la aplicación de dichos resultados a nivel internacional.

La diferencia del nivel acústico exterior-interior de las 26 fachadas se midió el índice de reducción de sonido aparente de las mismas dentro del rango de frecuencias de 50 a 5000 Hz

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

según ISO 16283-3 [059]. Dicho estudio demostró que las diferencias de valores del nivel de ruido a frecuencias más bajas eran más grandes de lo esperado.

Por su parte la investigación de Elena Badino et al [060], lleva a cabo un estudio sobre las características que tienen que tener las fachadas de los edificios, en su comportamiento frente al ruido presente en las calles. Los principales resultados del estudio realizado muestran una serie de pautas a seguir en el diseño de las fachadas de los edificios como son:

a) La disposición de balcones que permiten reducir los niveles de presión sonora, a partir del tercer piso en 2 dB, mientras que no se muestran variaciones significativas de la presión en los pisos inferiores (los más bajos).

b) En cuanto a la dimensión de los balcones, el aumento de la profundidad del mismo de 0,9 m a 1,5 m genera una reducción de los niveles de presión sonora en 1 dB, sobre la fachada del caso de estudio. Esto reduce significativamente los niveles de presión sonora a partir del tercer piso en un valor de 3 dB, mientras que por el contrario es aconsejable reducir la profundidad del balcón en el segundo piso con el fin de limitar la reflexión sonora desde el balcón superior hacia el primer piso.

c) Por otro lado, el valor de la inclinación de los parapetos presentes en los balcones en sus superficies inferiores, presenta también una gran importancia en la reducción de la presión sonora, sobre la fachada del caso de estudio que se puede incrementar en 1 dB.

d) La mejora de las propiedades de absorción de sonido de los materiales utilizados en el revestimiento de la fachada de estudio, es capaz de reducir en mayor medida el nivel de presión sonora en la propia fachada y en la fachada opuesta.

Por todo ello, se puede afirmar que una fachada geoméricamente optimizada requiere ser rehabilitada con materiales absorbentes de sonido y puede lograr una mayor reducción de hasta 10 dB en el nivel de presión sonora, en la fachada de este caso de estudio, que se corresponde con un valor medio de 38 dB. Este valor es 7 dB inferior al valor límite de la OMS de 45 dB para el ruido de tráfico [061].

Por el contrario, se encuentra una reducción media del nivel de presión sonora de únicamente 1,5 dB en la fachada del caso de estudio con la aplicación de una pavimentación del vial de acceso al edificio, con un material absorbente de sonido.

Este artículo muestra el gran potencial que tiene el diseño arquitectónico en la mejora del confort acústico en las ciudades y avala la importancia de la introducción de las preocupaciones acústicas, desde las primeras etapas de diseño de los edificios, de cara a reducir el nivel de ruido presente en el edificio.

En este mismo sentido D.Montes González et al [062] lleva a cabo el análisis de cómo incide el ruido en las fachadas de los edificios, en función de la presencia de las líneas de estacionamiento de vehículos en los viales de acceso a los edificios, al mostrar cómo se pueden comportar como una barrera frente al ruido generado por los vehículos en circulación.

La Directiva Europea 2002/49/CE indica que los mapas estratégicos de ruido son la principal herramienta para realizar la evaluación de la exposición de la población al ruido ambiental. Estos mapas se hacen a través de métodos computacionales, la presencia de alineaciones de vehículos estacionados en los lados de las calles urbanas no suele tenerse en consideración,

pero el estudio presentado sugiere la posibilidad de que su efecto sobre la exposición real al ruido en las fachadas de los edificios no sea insignificante.

La presencia de vehículos estacionados a los lados de las calles urbanas representa una modificación significativa del campo sonoro existente en la zona entre la fachada del edificio y la línea de aparcamiento.

Dada una posición fija del vehículo estacionado con respecto a la fachada del edificio bajo evaluación, si la distancia entre el vehículo estacionado y la fuente de sonido varía, los resultados más relevantes que se observan en el estudio realizado son:

a) Cuando las distancias entre la fuente del sonido y la línea de estacionamiento no excedan de una distancia de 4 m, se observa como en muchas alturas, hay diferencias importantes entre las situaciones “con” y “sin” vehículo estacionado. Hay que tener en cuenta que la configuración más común en el diseño urbano, es aquella en la que los carriles de tráfico están muy próximos de las líneas de aparcamiento.

b) Las diferencias más importantes en el comportamiento acústico del efecto barrera se observan, entre las alturas de 1,5 m y 4 o más metros y tienen lugar desde una distancia “fuente sonora – vehículo estacionado” superior a 4 m. Hay que tener en cuenta que estas configuraciones se corresponden a muchas avenidas secundarias de ciudades de todo el mundo, y es de gran importancia evaluar el impacto del ruido en la población a través de medidas en el medio urbano.

c) Se observa una diferencia significativa entre los valores previstos en las fachadas de construcción a alturas de 4 y 8 m en el rango de distancias entre la fuente sonora y el vehículo estacionado de 1,5-2 m. Consideramos que estas configuraciones corresponden a muchas calles europeas de la ciudad con edificios de tres alturas. Estas diferencias entre los resultados de ambas alturas llevarían a considerar que el uso de 4 m como altura de referencia para la validación de mapas de ruido calculados puede no ser apropiado. Si se utiliza, el impacto del ruido del tráfico en la población en niveles más altos del edificio podría encontrarse distorsionado.

Un factor a tener en cuenta en la definición de las fachadas de doble piel, es **la garantía de las condiciones de iluminación natural**, para tratar de reducir en lo posible la dependencia de la iluminación artificial, esto es debido principalmente a que la doble piel recoge la radiación solar externa, pero genera zonas con menores niveles de iluminación, o de sombra en el interior de los edificios, que habitualmente pueden requerir del apoyo de la iluminación artificial para poder garantizar los niveles de iluminación adecuados en el interior del edificio. Pero evita la colocación de elementos parasoles, que reducen la radiación incidente en el edificio, y pueden generar problemas funcionales en el interior del edificio, donde se suelen disponer de cortinas, que reducen esa radiación, pero al estar dispuestas en el interior aunque no dejan que la radiación solar pase directamente al interior del edificio, si que han pasado por el cerramiento acristalado, y generan el calentamiento de las cortinas, y con ello se produce un calentamiento en el interior del edificio, lo que se traduce en un aumento de la temperatura interior, y en las estaciones más calurosas, necesitará un mayor consumo de energía en el sistema de climatización.

Según Seyed Morteza et al [063] en las fachadas activas se lleva a cabo la participación activa de los ocupantes de un edificio, de cara a llevar a cabo un control avanzado de la luz diurna. De modo que tiene la capacidad de filtrar jerárquicamente la luz del día y en tiempo real, evitando

molestias en la luz del día en los ocupantes del edificio. Esto se lleva a cabo mediante una serie de elementos modulares prismáticos cinéticos que difunden la luz del día con configuraciones jerárquicas y ello genera en la fachada un proceso de autosombreado para disminuir la intensidad de la radiación solar directa y dejar que la luz diurna útil adecuada entre en el espacio interior. Este sistema proporciona más luz diurna útil en un sistema 3D-SCF que en un sistema plano o 2D-SCF, con un margen de aprovechamiento que ronda el 24% en la solución 3D frente al 17,8% de la solución 2D.

Respecto al confort, Amir Tabadkani et al [064] investiga un enfoque paramétrico pionero en la búsqueda del mayor rendimiento de la luz diurna y evitar al máximo el malestar producido por deslumbramiento, para ello se desarrolló un novedoso sistema de sombreado hexagonal cinético. Sobre el mismo se pueden implantar varios patrones de movimiento, que se han probado a gran escala en una fachada real comparando los resultados de las más de 1800 simulaciones, con los ensayos realizados en la fachada real. El sistema planteado en el presente estudio muestra la posibilidad de controlar el rendimiento visual en las zonas interiores del edificio en función de la demanda de los usuarios, en una unidad de oficina, que es el uso del edificio analizado.

La comodidad visual se ha planteado como el estado de ánimo, que representa las necesidades de los usuarios, la preferencia de los mismos y la satisfacción con el entorno visual interior, impactando en la salud mental y física [065]. Esta comodidad visual se ha estudiado generalmente mediante la evaluación de algunos factores que afectan a la correlación entre las necesidades humanas y el entorno de luz presente en el interior del edificio, incluyendo la cantidad, uniformidad y calidad de la luz, en los colores que se muestran en la estancia interior, y la predicción de riesgo de usuarios [066]. Sin embargo, los parámetros mencionados se encuentran relacionados entre sí y un estudio basado en índices generalmente se concentra en sólo uno de ellos, potenciando el resultado en aquellos que son de mayor interés [067].

Para Daniel Uribe et al [068], el confort visual de los trabajadores presentes en el interior de un edificio, es analizado con la disposición de unas persianas móviles entre una fachada de doble piel resuelta mediante dos láminas de vidrio, dicho análisis se estudia con diferentes estrategias de control aplicadas a las persianas móviles, que se encuentran realizadas mediante lamas de chapa perforada, y que se ha planteado en diferentes climas. Estas estrategias aplicadas a las persianas móviles, permiten mejorar la comodidad visual de los usuarios del edificio. Por otro lado, estas estrategias permiten también minimizar el consumo de energía en el edificio. Las conclusiones más importantes del trabajo identifican que las estrategias de control más simples para implementar en un edificio, son aquellas que no requieren la disposición de sensores en el edificio y en algunos casos, la utilización de persianas perforadas fijas, puede tener un funcionamiento mejor que las lamas móviles.

Para llevar a cabo este estado del arte se ha llevado a cabo un estudio, en esta temática de las fachadas de doble piel, aunque hay que tener en cuenta que en la búsqueda en sciencedirect.

Con el termino fachada han aparecido 26.393 resultados, afinando el estudio únicamente a las fachadas de doble piel aparecen aparece un gran número de publicaciones relacionadas, en realidad esto ocurre porque se mete dentro del mismo concepto de fachadas de doble piel, a una serie de fachadas como las fachadas ventiladas que presentan también una segunda piel envolvente del aislamiento y del propio edificio, aunque este tipo de fachada está relacionada con la que se pretende analizar en este 2215 resultados. Aunque hay que tener en cuenta que

en este conjunto también se incluyen artículos relacionados con las fachadas ventiladas, que presentan una doble piel y también algunos muros cortina, que presentan una doble fachada con una cámara de aire interior, de forma que el número de resultados relacionados es mucho más reducido.

Centrando la búsqueda en esta solución de fachada y comportamiento mecánico, indica que aparecen 961 resultados.

Centrando la búsqueda en las fachadas de doble piel y su comportamiento térmico, indica que aparecen 1273 resultados.

Centrando la búsqueda en el comportamiento acústico, de esta solución constructiva, aparecen 458 resultados.

Centrando la búsqueda en el confort visual, de esta solución constructiva, aparecen 552 resultados.

Y finalmente si se realiza la búsqueda de fachadas de doble piel resueltas en chapas perforadas, aparecen únicamente 149 resultados, de los que apenas hay 10 documentos que realmente traten esta solución constructiva.

Para la elaboración del presente estado del arte se han ido analizando los mismos de forma pormenorizada y se puede observar como el número de artículos realmente relacionados con la temática planteada es muy escaso. Aquellos que se han ido seleccionando son los artículos que realmente hacían referencia a la temática analizada y en algunos casos se han ido seleccionando otros, que aun no encontrándose directamente relacionados con este tipo de soluciones de fachada, sí que tenían interés por la relación con el análisis que se estaba realizando.

2.6. EJEMPLOS DE ENVOLVENTE DE DOBLE PIEL

Finalmente se muestran varias realizaciones en las que se ha aplicado esta tipología de fachada de doble piel, además de las que ya se han ido mostrando en el desarrollo del presente capítulo.

En el estadio de San Mamés Berria, esta solución constructiva se encuentra resuelta tras las piezas blancas que revisten los 5 anillos exteriores, que sirven de pantalla para la iluminación Led. La chapa perforada se ha colocado con un color negro que permite resaltar el blanco de las piezas exteriores. Y en la zona norte del campo se ha dispuesto también una zona acristalada que impide que en días de lluvia el agua pueda pasar a través de la envolvente.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.



Figura 2.33. Estadio San Mamés. Bilbao-España. Acero galvanizado y lacado.



Figura 2.34. Club deportivo. Jaén-España. Aluminio lacado.



Figura 2.35. Facultad de gastronomía. San Sebastián-España. Aluminio anodizado.



Figura 2.36. Centro deportivo. Madrid-España. Acero galvanizado lacado.

2.7.- CONCLUSIONES

Las fachadas son uno de los elementos de mayor importancia en los edificios al servir de frontera entre el interior y el exterior. Esto es debido a que este elemento nos debe proteger no solo de las inclemencias climatológicas, bien sea con altas o bajas temperaturas, o fuertes vientos o lluvia. Hoy en día a las fachadas de los edificios también se les exige unos elevados niveles de confort acústico, y eficiencia energética.

En el presente estado del arte se ha podido comprobar como esa importancia que tienen las fachadas de los edificios se plasma en la gran cantidad de publicaciones de interés científico que se han encontrado con esta temática.

En el caso de las fachadas de doble piel, el número de publicaciones encontradas es mucho más reducido, y si nos centramos en el caso de las fachadas de doble piel de chapa perforada.

Se trata de una solución de envolvente que se está proyectando mucho en los últimos años por su rapidez de montaje y las ventajas principales que presenta en la reducción de la radiación solar, junto con la posibilidad de dar al edificio la estética deseada por los diseñadores del mismo.

También presenta una serie de ventajas desde el punto de vista de la reducción del ruido aéreo presente en el exterior, y que además permite reducir el ruido en la propia calle.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1.- INTRODUCCION

El desarrollo de la presente Tesis Doctoral ha seguido una metodología basada en la realización de una serie de simulaciones mediante programas informáticos, que posteriormente han sido contrastados mediante ensayos, de forma que se ha podido depurar el comportamiento de los modelos planteados.

De este modo, la metodología planteada ha seguido el siguiente esquema:

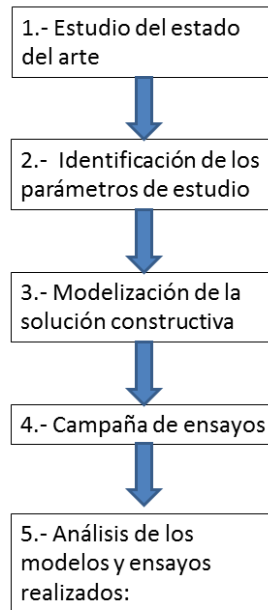


Figura 3.1. Esquema de la metodología utilizada.

Fase 1.- Estudio del estado del arte

Se ha buscado toda la información disponible al respecto de la temática planteada, en las bases de datos de la Universidad tanto en la UPV/EHU como en la Universidad de Oviedo, como son (Science direct, ASCE, SCOPUS, Springer y web of Science). Buscando diferentes términos, relacionados con la temática presentada como son: “fachadas”, “doble piel”, “chapa perforada”, “caracterización resistente”, “caracterización acústica”, “confort térmico” o “confort visual”. Esta búsqueda ha servido como punto de inicio al análisis realizado en la presente Tesis Doctoral y una parte de estos artículos aparecen referenciados en la bibliografía de la presente Tesis, ya que están directa o indirectamente relacionados con la temática analizada. Si bien es cierto que se ha podido comprobar como este tipo de fachadas de doble piel, realizadas utilizando chapa perforada, que puede ser de acero o aluminio, no presenta una gran bibliografía, analizando sus características, o sus usos en edificación, es por ello que resulta interesante y novedoso, realizar el presente tema de investigación y caracterización en el ámbito de la presente Tesis Doctoral.

Fase 2.- Identificación de los parámetros de estudio

Debido a las características tan peculiares que presenta este tipo de fachadas de doble piel, se han planteado una serie de variables de análisis, de cara a conseguir una adecuación lo más optimizada posible en su uso en las edificaciones. Entre las variables analizadas, se pueden distinguir en función del ámbito de estudio. Así se plantea una caracterización mecánica, que permita establecer cuáles son las dimensiones óptimas de este tipo de chapas perforadas para su uso en edificación, teniendo en cuenta que el origen de las mismas es habitualmente una bobina, que se va desplegando y perforando para posteriormente realizar unos dobleces en las mismas que son los que le aportan rigidez para poder soportar los esfuerzos principalmente de viento, que van a tener que soportar durante su vida útil.

En la caracterización acústica se plantea una serie de variables con las que se quiere establecer el aislamiento frente al ruido que puede generar esta solución constructiva frente al ruido aéreo exterior.

En la caracterización térmica se analizan las variables que afectan a la reducción de la radiación solar incidente y con ello el establecimiento del consumo de energía interior necesario para poder alcanzar el confort interior adecuado en el interior del edificio.

En la caracterización del confort visual de los usuarios se establecerán igualmente una serie de variables de análisis que se estudiarán mediante los resultados de una encuesta, que se ha realizado en una población objetiva.

Fase 3.- Modelización de la solución constructiva

Con el uso de programas informáticos de simulación del comportamiento de los diferentes materiales se realizan un conjunto de simulaciones en diferentes ámbitos que permiten conocer el comportamiento de la solución constructiva. Estos programas pueden estar ya testados previamente con algunos materiales o soluciones constructivas más habituales, pero en este caso ante la ausencia de modelos de comportamiento de fachadas de doble piel compuestas mediante fachadas de chapa perforada, se ha optado por realizar una serie de ensayos posteriormente. Estas simulaciones se han realizado con programas comerciales ampliamente utilizados en otros estudios o investigaciones previas como es el programa de elementos finitos Ansys, o el programa de simulación acústica SoundFlow.

Fase 4.- Campaña de ensayos

Debido a la ausencia de modelos de comportamiento previos con los que poder hacer comparativas de resultados entre modelos, se ha optado por la realización de varias campañas de ensayos con muestra facilitadas por empresas fabricantes de este tipo de elementos constructivos, como son la empresa IMAR S.A., o la empresa RMIG. Ambas empresas han facilitado muestras de diferentes tamaños, realizadas tanto en acero, como en aluminio, y que han sido ensayadas para analizar su comportamiento mecánico resistente, fluido dinámico y acústico real, con ensayos establecidos al uso, debido principalmente a los medios disponibles así como por la ausencia de una normativa en vigor que permita realizar la caracterización de estas muestras.

Fase 5.- Análisis de los modelos y ensayos realizados

Tras la realización de la campaña de ensayos se han podido comparar éstos con los modelos planteados, esta es una parte muy importante del trabajo de investigación, ya que permite depurar los modelos de comportamiento, y de esta forma se puede conocer mejor el comportamiento de los diferentes materiales y soluciones constructivas utilizadas.

3.1.1.- Estudio del estado del arte

Se trata del primer paso a realizar en todas las investigaciones y es uno de los pasos más importantes de cara a conocer el estado actual del conocimiento, para ello se deben de buscar todas aquellas referencias a investigaciones realizadas previamente que puedan estar relacionadas con la temática de estudio. Es también importante realizar dicha búsqueda en fuentes de información de reconocido prestigio.

En este caso, esas referencias se han buscado en las bases de datos disponibles en la Universidad del País Vasco, como son (Science direct, ASCE, SCOPUS, Springer y web of Science), para ello se ha establecido previamente una serie de palabras clave que pueden dar lugar al conocimiento de artículos relevantes en la temática, entre ellas están las siguientes:

“fachadas” 26.393 resultados,

“fachadas + doble piel” 2.215 resultados,

Afinando el resultado de la búsqueda a las fachadas de doble piel que están formadas por una chapa perforada, se observa como el número de publicaciones que aparecen es mucho más reducido.

“fachadas + doble piel + chapa perforada” 140 resultados,

“fachadas + doble piel + chapa perforada + caracterización resistente” 118 resultados,

“fachadas + doble piel + chapa perforada + caracterización acústica” 76 resultados,

“fachadas + doble piel + chapa perforada + confort térmico” 130 resultados, y

“fachadas + doble piel + chapa perforada + confort visual” 0 resultados.

Hay que tener en cuenta que en estas búsquedas, de entre los resultados que aparecen hay que hacer una revisión de los mismos ya que en bastantes casos, aunque las palabras clave o las palabras de búsqueda puedan coincidir, el documento puede no mostrar resultados que sean de interés, o no se encuentra relacionado directamente con la investigación que se realiza.

De este trabajo de investigación sobre la temática planteada se puede establecer que las fachadas son un elemento constructivo de un elevado interés científico principalmente por tratarse de una parte importante de los edificios, que se encuentra en contacto con el exterior,

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

donde se encuentran diferentes zonas climáticas con requisitos muy diferentes entre ellas, lo que incentiva que se realicen muchas investigaciones en este ámbito de estudio.

Por otro lado, dado el creciente interés por la reducción en el consumo de energía, de cara a la reducción del impacto ambiental, se plantean diferentes soluciones que permiten reducir los consumos energéticos en el interior de los edificios, se plantean también el uso de nuevos materiales, más ligeros, más aislantes, en piezas de mayores dimensiones y basándose muchos de ellos en el aprovechamiento de subproductos industriales, con objeto de minimizar el impacto ambiental, o incentivar la economía circular. Otro aspecto que se analiza en algunos de los artículos estudiados es la industrialización del proceso constructivo de cara a mejorar la eficiencia del mismo, así como la integración de fuentes de energía renovable en las fachadas de los edificios al tratarse de una superficie de grandes dimensiones presente en las edificaciones y que con una buena orientación del edificio puede permitir un gran aprovechamiento energético, mejorando la eficiencia energética de la edificación.

En el caso de las fachadas de doble piel aparecen un 8,3% de publicaciones en referencia a la temática más generalizada de las fachadas. Se trata de un número bastante elevado, aunque hay que tener en cuenta que dentro de estas fachadas de doble piel se integran también las fachadas ventiladas, que se trata de una técnica constructiva que se está extendiendo mucho en las últimas décadas, debido a las ventajas constructivas que presenta, como el disponer de un aislamiento continuo en toda la fachada, con una cámara de aire interior, que permite que se lleve a cabo un movimiento del aire en invierno y en verano, que hace que la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior sea más suave, y con ello las pérdidas se reducen.

Con relación a las fachadas de doble piel resueltas mediante elementos de chapa perforada el número de publicaciones se reduce a algo más del 6% de las publicaciones relacionadas con las fachadas de doble piel y cerca de un 0,5% con relación a la temática de fachadas. En este caso, el reducido número de publicaciones es un indicador, de la novedad en el ámbito de la investigación sobre este tipo de soluciones constructivas de fachada, de las cuales se están empezando a construir en edificios con diferentes usos, principalmente de carácter terciario (oficinas, edificios docentes, estadios deportivos, concesionarios de coches, etc.).

Cuando se busca información sobre la caracterización mecánica de este tipo de elementos, la información real que se puede obtener es muy reducida, se puede obtener algo más de información sobre las ventajas que puede tener esta envolvente desde el punto de vista acústico y térmico, aunque se trata de un número muy reducido de publicaciones, y además hay que tener en cuenta que algunas de estas publicaciones no tratan directamente el tema.

3.1.2.- Identificación de los parámetros de estudio

En la metodología seguida el segundo de los apartados que se ha establecido, es la identificación de una serie de parámetros de los que se quiere analizar su comportamiento, para poder caracterizar el sistema constructivo de las fachadas de doble piel.

Estos parámetros se han dividido, en función del tipo de estudio que se va a abordar:

Así desde el punto de vista de la caracterización mecánica de las chapas perforadas, se ha analizado las dimensiones constructivas habituales, que se encuentran en torno a los 3 metros de longitud (que se puede fijar en base a la altura de las plantas de los edificios, en torno a los 3, o 4 metros), y cerca de un metro de anchura (que viene definida por el ancho de la bobina de chapa a la que hay que reducir por los dobleces que mejoran la rigidez de la chapa). En este sentido la solución constructiva basada en la creación de la doble piel que se debe de fijar a la fachada del edificio mediante una subestructura auxiliar, se puede resolver habitualmente de dos formas. La primera consiste en utilizar unos marcos realizados mediante angulares en los que se suelda la chapa perforada y que generalmente presenta dobleces en las caras laterales de la chapa en la dirección longitudinal y también en la dirección transversal, esta es la opción que presenta un mayor sobrecoste, por la ejecución y soldadura de la chapa al marco. La segunda opción, es más económica y se basa en realizar una serie de dobleces en los lados de la chapa, de forma que se pueda aumentar la rigidez de la misma sin el incremento del coste que supone la construcción del marco y su soldadura al mismo. Estos dobleces pueden ser simples, dobles (esto quiere decir que se doble 2 veces el lateral), y en este segundo doblez además de mejorar la inercia de la chapa permite disponer de una superficie plana paralela a la fachada que puede utilizarse para fijar la chapa a la subestructura auxiliar, también pueden ser triplex, realizando una sección tubular cuadrada.

Es por ello que desde el punto de vista de la caracterización mecánica de las piezas que componen la fachada de doble piel de chapa perforada, se puedan introducir como variables, las dimensiones de los dobleces (primero y segundo) en las dos direcciones del rectángulo de chapa que las conforma, también se han establecido como variables de estudio, las dimensiones de la chapa y el material en el que se encuentran fabricadas, que habitualmente es acero galvanizado y en otros casos aluminio, por las ventajas que presenta frente a la posible corrosión, aunque la menor resistencia de este material hace que los espesores necesarios sean mayores, y con ello también el coste del mismo.

Respecto a la caracterización acústica se han planteado también una serie de variables de estudio que son las que más pueden influir, en la mejora que puede producir, la colocación de esta doble piel en el edificio, entre ellos se encuentran el tipo de material, cuya densidad aportará más o menos masa y con ello el comportamiento puede ser diferente, otra variable es el diámetro de los agujeros que se perforan en las chapas, ya que dicho tamaño, junto al porcentaje de agujeros presentes en la chapa, pueden influir en el aislamiento acústico que se pueda generar. Y también se ha analizado la distancia de la pared a la que se puede colocar la chapa perforada, para ver cómo influye esta variable en el aislamiento acústico. Este espacio cuando es reducido no tiene ningún uso, pero en distancias cercanas a un metro se suele utilizar como zona accesible para labores de mantenimiento de la fachada e incluso como zona de paso de las instalaciones del edificio, por lo que suele ser practicable, por medio de un suelo de tramex.

Desde el punto de vista de la caracterización térmica, las variables no dependen solamente de las características de la doble piel de chapa perforada, también se encuentran relacionadas con la localización geográfica del edificio y la orientación del mismo. Con relación a la doble piel la principal variable a tener en cuenta es el grado de perforación existente en el material, que permite una mayor o menor entrada de la radiación solar en el interior del edificio, que es

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

el parámetro que permite acercarse o alejarse de las condiciones de confort en el interior de los edificios en función de las temperaturas interiores y exteriores.

Por último se ha analizado el confort visual de este tipo de fachadas de doble piel, ya que hay que tener en cuenta que este tipo de soluciones genera una envolvente, en muchos casos continua, en el exterior del edificio, que no genera problemas en las personas que se encuentran en el exterior del edificio, ya que esta doble piel cubre toda la fachada, y permite ocultar mediante la radiación solar las características reales de la fachada interior, que se muestran realmente cuando se reduce la radiación solar permitiendo ver la fachada interior del edificio como se aprecia en la figura 3.2.

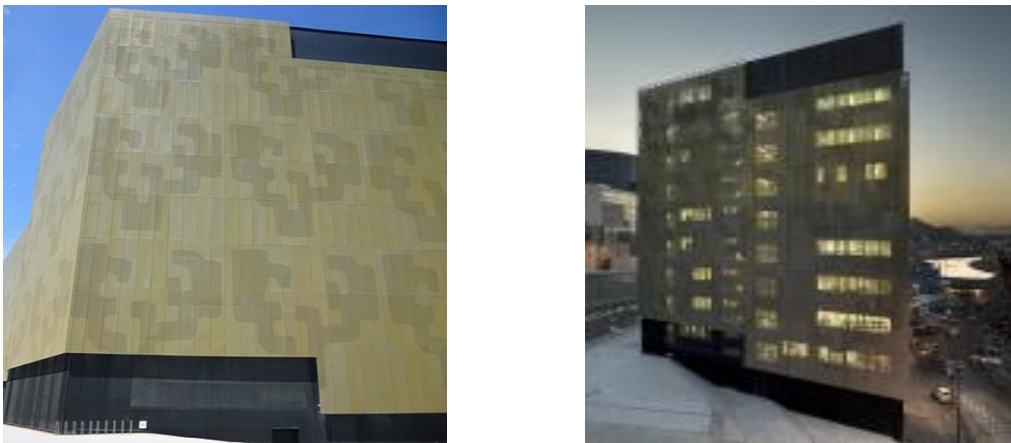


Figura 3.2. Fotografías edificio Escuela de Ingeniería Bilbao de día y de noche.

El problema se presenta por el interior del edificio ya que este sistema de enmascaramiento del edificio, genera una visual por el interior de las ventanas, en forma de velo, que permite observar el exterior del edificio con mayor o menor nitidez. En algunos edificios se han producido quejas por parte de los trabajadores del centro, por dicha sensación, es por ello que se ha realizado un proceso participativo en el que han colaborado los alumnos de la Universidad y en el que se les han colocado diferentes muestras de materias, con diferentes grados de perforación como variable a valorar, para poder obtener información sobre el grado de molestia que se genera en este tipo de envolventes de doble piel.

3.1.3.- Modelización de la solución constructiva

De cara a poder realizar una serie de simulaciones del comportamiento de los materiales y las soluciones de fachadas de doble piel, se han utilizado una serie de programas informáticos con los que obtener unos valores previos fiables al tratarse de programas de simulación que ya se han utilizado con estos materiales, y partiendo de los mismos poder reducir la escala de ensayos a realizar.

Estos programas son herramientas habituales de trabajo en la realización de simulaciones en cada uno de los ámbitos en las que han sido utilizados, y se han testado previamente con materiales o soluciones constructivas más habituales. En el caso que nos ocupa, para las fachadas de doble piel resuelta mediante chapa perforada, no se han encontrado referencias concretas de este tipo de análisis, pero si se sabe que estos programas permiten hacer simulaciones contrastadas por otras investigaciones de carácter experimental. Aun así en algunos casos se han realizado una serie de ensayos que nos han permitido validar las simulaciones realizadas y afinar los modelos de comportamiento.

Con relación a la modelización mecánica de las chapas perforadas, se ha contado con el programa ANSYS WORKBENCH (Swanson Analysis Systems, Inc.), que se encarga de prestar soporte a la ingeniería mediante el uso de elementos finitos destinados a la simulación, que predicen cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. [069]. El programa de elementos finitos, resuelve sistemas estáticos y cuasi-estáticos en los que el sistema se comporta de forma lineal. En este caso se ha utilizado el programa para conocer el comportamiento de las chapas perforadas frente a la acción del viento, teniendo en cuenta que las chapas se encuentran unidas mediante 4 puntos a la estructura secundaria, que se ha supuesto que tiene una rigidez infinita. Se ha utilizado los materiales acero y aluminio en la caracterización mecánica y se ha dibujado la geometría real a las chapas perforadas utilizadas. De cara a la realización del cálculo, en una parte de los modelos se ha realizado el estudio con la chapa completa y en otros casos se ha realizado una simetría de la pieza completa, en un cuarto de la misma para poder reducir los recursos utilizados en la evaluación del comportamiento del material.

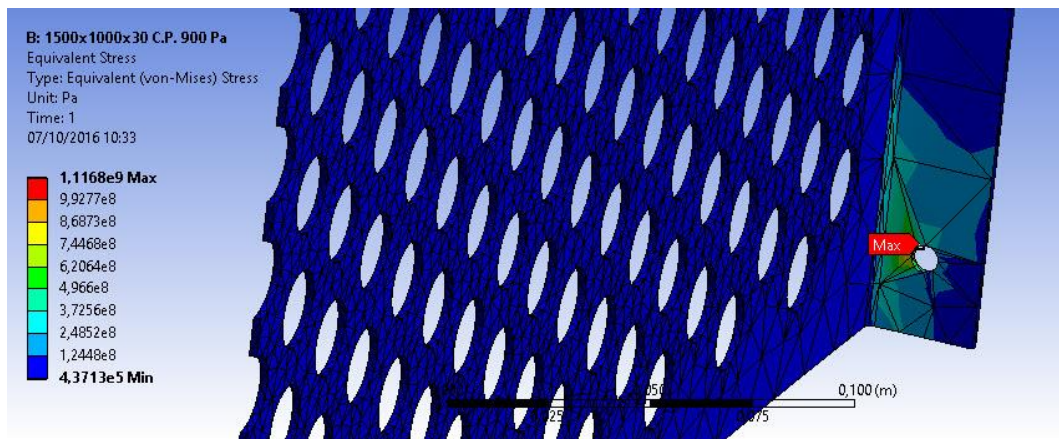


Figura 3.3. Modelo utilizado para la simulación en Ansys.

Para realizar la caracterización acústica se ha utilizado un programa informático denominado SoundFlow AFMG [070]. Es un software de simulación para el cálculo de la absorción, reflexión y transmisión del sonido en estructuras multicapa. Permite realizar la simulación de estructuras de pared, suelo y techo mediante la definición de los materiales utilizados en dichas capas, y aportado su espesor y propiedades.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Dispone de una base de datos de materiales, donde se dividen en tres clases: absorbentes, chapas perforadas y placas. Por esta razón ha sido el programa elegido ya que existen otros programas comerciales que pueden realizar también simulaciones de este tipo, pero hay que introducir las características geométricas de las chapas perforadas, mientras que este programa, ya dispone de patrones relacionados con las características geométricas de las chapas perforadas, de modo que solamente hay que indicar los parámetros que la definen, como es la forma de los agujeros, el diámetro de los mismos, o el porcentaje de superficie perforada frente a la superficie total de la chapa, para poder hacer la simulación con una mayor sencillez en la introducción de los datos de entrada.

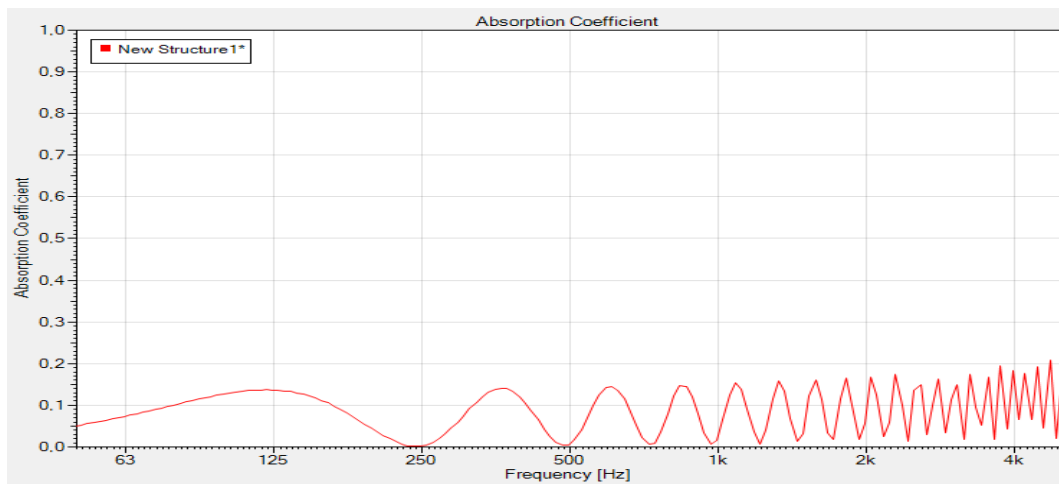


Figura 3.4. Resultado simulación con el programa Soundflow.

En el caso de las simulaciones ambientales el trabajo se ha recopilado información sobre mediante el programa informático DESING BUILDER [071], que permite realizar el diseño de edificios energéticamente eficientes, ya que permite simular el ambiente exterior en una determinada ubicación geográfica con los datos climáticos de ENERGY PLUS [072], además con esos datos y las características de la envolvente del edificio y las instalaciones presentes en el mismo, lleva a cabo simulaciones del consumo energético que se produce en el edificio, tanto en las instalaciones térmicas (calefacción o refrigeración), como en los sistemas de alumbrado o los consumos de los equipos de trabajo presentes en el edificio. También permite establecer elementos de protección solar en el edificio e identificar las dimensiones que deben de tener los mismos para que sean lo más efectivos posibles. En nuestro caso este recurso se ha aplicado en toda la envolvente del edificio generando una especie de velo exterior que permitía dejar pasar un porcentaje de la radiación solar correspondiente a la porosidad (% de huecos de la chapa perforada).

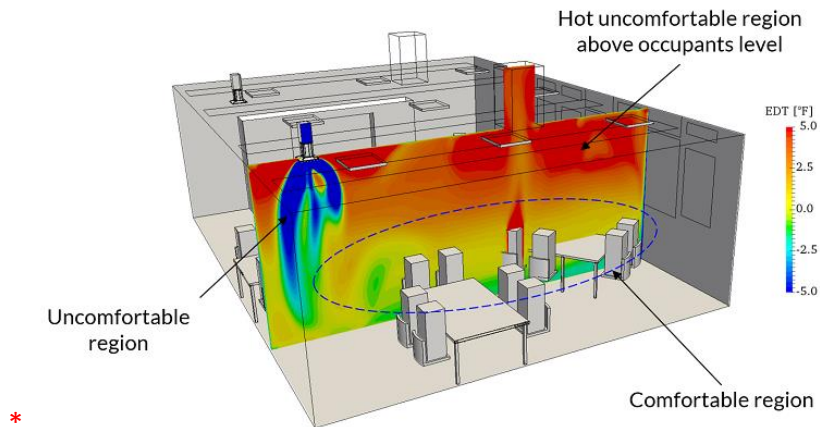


Figura 3.5. Simulación térmica con el software Design Builder.

3.1.4.- Campaña de ensayos

La realización de modelos de comportamiento de las diferentes propiedades, que se están analizando en el desarrollo de la presente tesis, han sido contrastados mediante diferentes campañas de ensayos.

Las probetas utilizadas han variado en función del tipo de ensayo a realizar y de las propiedades que se han estado buscando. De esta forma se ha contado con chapas perforadas de dimensiones reales 3000x1000 mm² en acero, que se utilizaron inicialmente para poder analizar el comportamiento de una chapa a escala real, y en la que se habían realizado diferentes dobleces con objeto de mejorar la rigidez de la misma.

Inicialmente con las muestras de mayor tamaño se diseñó un ensayo en el laboratorio de construcción de la Escuela de ingeniería Bilbao, donde se dispusieron las muestras en posición horizontal, para ser posteriormente cargadas mediante una serie de láminas de impermeabilización que disponen de un peso constante de 5 kg/m², generando de esta forma una serie de escalones de carga que han sido monitorizados en su deformación en un conjunto de 6 puntos, la finalidad de estos ensayos ha sido establecer las deformaciones de este tipo de elementos constructivos para poder contrastar los modelos simulados mediante el programa ANSYS

Las chapas de 1500x1000 mm² en acero y en aluminio, buscaban validar los modelos de comportamiento realizados con el programa ANSYS en los modelos precedentes, y finalmente chapas de 400x200 mm², en acero y en aluminio, y con una gama de tamaños de agujero, y porcentaje de huecos, que ha servido para poder caracterizar mediante ensayos la deformación al paso del aire en un túnel de viento, el aislamiento acústico que genera su interposición entre las fachadas y el exterior, así como para poder establecer el confort visual que se tiene desde el interior del edificio al mirar por los huecos de ventana presentes en el mismo. Ya que este tipo de sistemas de fachada de doble piel, presenta la peculiaridad de ser opacos cuando se observa el edificio desde el exterior en presencia de la radiación solar, y por las noches se puede visualizar perfectamente el interior del edificio, desde el exterior del mismo.

Las muestras que se han utilizado en la realización de los ensayos han sido facilitadas por empresas fabricantes de este tipo de elementos constructivos, como son la empresa IMAR S.A. situada en Ortuella, o la empresa RMIG, que nos ha mandado unas muestras desde su antigua planta de Urduliz, y desde su fábrica de Reino Unido. Ambas empresas nos han facilitado muestras de diferentes tamaños, realizadas tanto en acero, como en aluminio, y que han sido ensayadas para analizar su comportamiento real, con ensayos establecidos al uso, debido principalmente a los medios disponibles así como por la ausencia de una normativa en vigor que permita realizar una caracterización más precisa de estas muestras.

3.1.5.- Análisis de los modelos y ensayos realizados

El último apartado del desarrollo metodológico planteado consiste en analizar los resultados de los modelos planteados y contrastados con los ensayos de cara a poder establecer una serie de recomendaciones de uso de este tipo de fachadas de doble piel, desde diferentes puntos de vista:

De cara al **diseño de las piezas** que se van a colocar. Es primordial conocer el comportamiento mecánico del material que se está utilizando (Acero o Aluminio), así como las dimensiones que son más adecuadas para poder establecer la composición de la fachada, para tratar de minimizar el coste económico, evitando la colocación de marcos se establece el tipo de doblez a realizar y sus dimensiones.

Desde el punto de vista de la mejora del **comportamiento acústico**, es interesante poder disponer de la información que identifique cual es la porosidad, tamaño máximo de los agujeros o distancia existente entre la doble piel y la fachada del edificio, para garantizar el mayor aislamiento acústico frente al ruido aéreo presente en el entorno del edificio.

Desde el punto de vista del **comportamiento térmico**, también interesa conocer para la ubicación del edificio, cual es la disposición más adecuada de este tipo de fachadas, y sobretodo el grado de perforación que mejor se adecue a las necesidades del edificio, por ejemplo en invierno nos interesa tener un grado de perforación mayor para permitir la entrada de mayor radiación en el edificio, con lo que se calienta de forma gratuita, pero en verano en climas calurosos, nos interesa que este grado de perforación sea menor, ya que esa radiación incidente va a alejar el interior de la zona de confort y se va a producir un mayor consumo energético de los sistemas de climatización.

Y por último no tenemos que olvidar el grado de **confort visual** de los usuarios del edificio, ya que esto en muchos casos tienen que pasar muchas horas en el interior de los edificios, y el hecho de tener un edificio que se encuentra cerrado por todas sus caras con una chapa perforada, puede generar un cierto desconfort visual, ya que no se ve de forma nítida el exterior del edificio, desde el interior del mismo.

De esta forma, mediante la metodología seguida se ha podido comprobar mediante diferentes modelos el comportamiento de las soluciones de fachada de doble piel, resueltas mediante chapas perforadas, de acero o aluminio. Siendo contrastados dichos modelos mediante una serie de campañas de ensayos mecánicos, acústicos y térmicos.

CAPITULO 9:
CONCLUSIONES Y
FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

9.1.-INTRODUCCION

En el presente capítulo se recopilan las conclusiones que se han ido obteniendo en el desarrollo de la tesis. Las mismas se han agrupado en el presente capítulo ordenadas según el desarrollo del presente documento de tesis.

Por otro lado en el desarrollo del presente trabajo de investigación han ido surgiendo nuevas líneas futuras de investigación en la temática presentada, que se pueden abordar en otros trabajos de investigación, para llevar a cabo un conocimiento más profundo sobre dichos temas de interés.

9.2.- CONCLUSIONES

Las fachadas son los elementos más importantes en los edificios ya que sirven de protección de las actividades que se desarrollan en su interior, frente a las inclemencias climatológicas, del exterior, pero también permiten garantizar unos determinados niveles de confort, y garantizar la eficiencia energética del edificio.

La presente Tesis doctoral se ha centrado en la caracterización de las fachadas de doble piel resultas mediante la disposición exterior de una envolvente de chapa perforada. Esta solución constructiva, se está introduciendo en el mercado de la construcción, principalmente por su alta componente estética, ya que permite realizar múltiples combinaciones de colores, formas, y texturas. Además su disposición como envolvente exterior permite ocultar por el día la disposición de los huecos de ventanas interiores, resaltando la envolvente. Y en aquellas zonas climáticas que presentan un mayor nivel de soleamiento, permiten reducir la radiación incidente en el edificio, al tener la chapa perforada por el exterior formando un velo protector.

Como no existe mucha información sobre el comportamiento de este tipo de soluciones de fachada se ha querido profundizar en el comportamiento de las mismas mediante el trabajo de investigación presentado, en el que se ha tratado de caracterizar la solución frente al comportamiento mecánico, fluidodinámico, acústico, térmico y de confort interior. Ya que hoy en día la selección de este tipo de fachadas entre los prescriptores se basa casi únicamente en la componente estética.

De esta forma se ha querido aportar un conocimiento más profundo sobre el comportamiento de este tipo de solución, de fachada para que sirva de guía, tanto a fabricantes de chapa perforada para edificación, como para los prescriptores de soluciones constructivas para edificación.

A continuación se muestran las conclusiones obtenidas de cada uno de los capítulos analizados en el presente trabajo de investigación:

En el **estado del arte** se ha comprobado la importancia que tienen las fachadas de los edificios a través de la gran cantidad de publicaciones de interés científico que se han encontrado en esta temática. Si se centra el estudio en las fachadas de doble piel, el número de publicaciones

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

encontradas es mucho más reducido, y si se concreta aún más en las fachadas de doble piel resueltas mediante el uso de chapa perforada, apenas se encuentran unos pocos artículos.

Este tipo de solución de envolvente se está proyectando mucho en los últimos años, principalmente por su facilidad de montaje y por su alta componente estética. Pero como se muestra en el presente trabajo de investigación, presenta también otras ventajas que pueden potenciar su uso, como es el caso de la reducción de los niveles de radiación solar, de la presión ejercida por el viento o de los niveles de ruido aéreo presentes en el entorno urbano.

En relación a la **caracterización mecánica** de la solución constructiva de la chapa perforada, se puede afirmar que la modelización del comportamiento de la chapa perforada, mediante la metodología de elementos finitos, es una herramienta adecuada para realizar su simulación y establecer el comportamiento de los modelos frente a las acciones a las que van a estar sometidos.

Respecto a los modelos planteados se ha buscado una solución constructiva basada en la realización de dobleces en los laterales de la chapa, que permitan eliminar la subestructura auxiliar que se coloca actualmente en muchos edificios, formada por unos marcos metálicos que rodean la chapa perforada.

Se ha podido comprobar cómo, la realización de un solo doblez en los laterales de mayor longitud, tiene un comportamiento adecuado, aunque la unión al soporte sea más complejo de ejecutar. En el caso de realizar dos dobleces, y disponiendo el sistema de unión en este último, aunque inicialmente se podría pensar que el comportamiento sería mejor en este segundo caso, al disponer de más inercia frente a la deformación, el hecho de disponer la unión en el plano paralelo a la chapa penaliza enormemente la deformación al producirse plastificaciones en la zona junto a la unión, además de realizar una solución de mayor coste, al tener que duplicar el número de dobleces por chapa.

A pesar de ello la solución de 2 dobleces presenta en el caso de disponer el segundo doblez hacia el exterior, la forma más sencilla de montaje en obra, aunque estéticamente puedan aparecer una serie de bandas verticales de separación entre chapas.

La disposición con un doblez en todas las caras (longitudinales y transversales) presenta el mejor comportamiento frente a la deformación máxima, con la solución más económica.

La dimensión óptima de los dobleces es de 30 mm ya que se observa como en la mayor parte de los casos que se han modelizado, es la dimensión en la que se observa una menor deformación.

Respecto al espesor de las chapas de cara a optimizar el coste, siempre es mejor utilizar espesores más reducidos para consumir la menor cantidad de material, pero después de los casos que se han analizado, se puede llegar a la conclusión que el espesor óptimo para una solución de chapa de acero, debería de ser de 2 mm que permite reducir considerablemente las deformaciones sea cual sea el tipo de solución de rigidización empleada.

Con relación al material el acero presenta mejores prestaciones que el aluminio, siendo este último menos resistente y con ello será necesario un mayor espesor de este material. La principal ventaja del aluminio se encuentra en su resistencia a ambientes agresivos como los marinos, donde el acero requiere de una serie de tratamientos que aumentan su coste, y mediante el uso del aluminio, se puede evitar dicho tratamiento, pero a costa de aumentar el espesor, lo que económicamente deja a ambos materiales en una horquilla de precio similar.

Tras el análisis del **comportamiento fluidodinámico** sobre ocho muestras de chapas, con diferentes configuraciones y características en el túnel de viento. Donde se han realizado tres ensayos diferentes a cada muestra para comprobar que los resultados obtenidos se han ajustado de una manera más fiel a la teoría correspondiente a su comportamiento, tanto en el análisis de la velocidad de entrada, a través de la relación entre el área perforada y la velocidad, y en el análisis de la diferencia de presión a la salida.

Se ha podido contrastar como las chapas que presentan mayor deformación son aquellas que tienen un mayor porcentaje de área abierta. Y dentro de las chapas con una menor área perforada presentan un mejor comportamiento aquellas que tienen un radio de perforación mayor.

En cuanto al material, se ha podido comprobar como el acero galvanizado soporta una mayor presión debido principalmente a sus mejores propiedades mecánicas frente al aluminio, lo que se ha traducido en menores deformaciones en todos los ensayos realizados frente a la misma muestra de chapa perforada con aluminio como material base.

Respecto al tipo de unión de las muestras con los apoyos en su fijación (forma articulada y rígida), ha podido determinarse que las muestras que disponen de una unión rígida presentan un mejor comportamiento, ya que, presentan deformaciones considerablemente menores.

Las chapas perforadas son una buena solución a la hora de proteger los edificios frente a los fuertes vientos. La velocidad máxima alcanzada en los ensayos, utilizando la unión articulada es de 6,7 m/s, lo que equivale a 24,12 km/h, supone una reducción en el impacto del viento libre de un 73,2 % del impacto del viento, suponiendo un grado 4 en la escala Beaufort, mientras que en el análisis disponiendo las uniones rígidas supone una reducción del 62,8 % alcanzando un grado 6.

Los valores de Reynolds obtenidos en el análisis con uniones articuladas son menores a los obtenidos en el análisis con las uniones rígidas. Estos datos concuerdan con la comparativa de velocidades, que son mayores en caso de uniones rígidas y ello implica unos valores del Reynolds mayores, tal y como se puede obtener en su fórmula, aunque en los dos casos se ha podido comprobar como el régimen producido es laminar.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

En la **caracterización acústica** realizada se puede observar como al ir incrementando la distancia existente entre la chapa perforada de doble piel y la pared de la fachada, la curva que relaciona el coeficiente de absorción con las frecuencias se desplaza. En la franja de los 125 Hz que coincide con la frecuencia habitual del tráfico rodado, el coeficiente de absorción es mayor con una separación chapa perforada-pared de 700 mm.

Con relación al diámetro de los agujeros de la chapa, no se produce la misma variación para las distintas frecuencias. Para los diámetros de 3mm, 5mm y 10mm el coeficiente de absorción varía de la misma forma para bajas frecuencias hasta aproximadamente los 1500 Hz. Para el diámetro más pequeño de 1 mm, se reduce el coeficiente de absorción en todas las frecuencias. La solución más eficaz en la reducción del ruido aéreo sería utilizar chapas perforadas con diámetros mayores a 3 mm.

La variación del coeficiente de absorción con la porosidad de la muestra de chapa perforada es prácticamente uniforme, de modo que cuanto menor es el % de área abierta el coeficiente de absorción es mayor y a medida que la porosidad de la chapa aumenta el coeficiente disminuye ligeramente. La chapa perforada que presenta mejor comportamiento es la que presenta un porcentaje de área abierta del 35% o menor.

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados, sirven para contrastar las modelizaciones y se puede llegar a la conclusión de que el comportamiento acústico de las muestras de chapa perforada, presenta mejores prestaciones cuando el porcentaje de área abierta sea menor, con un diámetro de perforación pequeño y con una separación entre perforaciones grande.

En cuanto al tipo de material de fabricación de las chapas, en base a los resultados obtenidos en los ensayos realizados, se puede observar que las chapas fabricadas con material de aluminio presentan un mejor coeficiente de absorción frente a las muestras de chapas perforadas fabricadas en acero galvanizado.

En referencia con la **caracterización térmica** de las soluciones de fachada de doble piel se puede afirmar que la utilización de una piel exterior de metal perforado, como sistema de protección solar, es beneficioso para el ahorro energético. Dicha piel provoca una disminución de las ganancias solares y por lo tanto, se produce una disminución de la energía calorífica que penetra en el edificio a través de los huecos o ventanas. Esta disminución de energía supone un descenso en la demanda de refrigeración, lo cual contribuye al ahorro energético y económico.

Puesto que la producción de frigorías es más costosa que la producción de calorías (entre 3 y 4 veces) la disminución en el aporte energético solar durante los meses fríos, influye en menor medida en el conjunto total de consumo de energía.

Existe una relación entre el diámetro de perforación de la chapa y el espesor de la misma que influye de forma notable sobre el porcentaje de área efectiva de radiación que atraviesa la chapa perforada. Cuanto mayor sea la proporción del espesor de la chapa respecto al diámetro del agujero, menor será el haz de luz que atraviese la perforación de forma directa. Así en el caso del comportamiento térmico interesa utilizar mayores espesores y menores diámetros de

perforación para aquellas latitudes en las que se precise mayor protección solar, dejando los diámetros de mayor dimensión y las chapas de menor espesor para las latitudes donde la protección solar no sea tan importante.

El porcentaje de área abierta, es de gran importancia, puesto que se trata del dato sobre el que se trabaja para determinar la cantidad de radiación solar que llega a la piel interior.

Se ha comprobado que el porcentaje de minoración de energía aumenta a medida que la latitud se acerca a los polos. Este aumento se ha cuantificado en un 1% por grado de latitud. A medida que nos desplazamos hacia el Norte la piel exterior es más eficaz.

Y como primer acercamiento hay que recomendar pieles con un diámetro de perforación pequeño en las fachadas Sur, para disminuir la ganancia solar y el sobre coste en refrigeración, y diámetros mayores en la fachada Norte para mantener un % de ganancia solar aceptable que no penalice en demasía la calefacción del edificio.

Para finalizar con relación a la **caracterización visual**, se ha procedido a realizar una encuesta, de la que se han obtenido diferentes conclusiones, relacionadas principalmente con las dos características más importantes de la chapa perforada, que son el porcentaje de área abierta y el tamaño de los agujeros.

Con relación al porcentaje de área abierta, se puede establecer que a medida que aumenta dicha superficie la percepción visual del exterior, por parte de las personas que se encuentran en el interior es mejor, independientemente del tamaño de los agujeros que presenten las chapas perforadas.

Por otro lado, con relación al diámetro de los agujeros, en distancias cortas la percepción visual mejora con los diámetros de menores dimensiones, y a medida que la distancia de observación aumenta, el diámetro del agujero no es una variable de importancia, ya que la percepción visual se uniformiza, adquiriendo mayor importancia el grado de perforación que presenta la chapa.

9.3.- FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

A medida que se ha ido trabajando en cada uno de los capítulos, en algunos casos han ido surgiendo apartados que se ha pensado en desarrollar, pero que harían que el trabajo de investigación siguiese realizándose de forma indefinida. Es por ello, que en este apartado se muestran aquellos temas que se pueden desarrollar a futuro en esta temática de las fachadas de doble piel resueltas con una envolvente de chapa perforada y que puede ser de gran interés, por la escasa investigación realizada hasta la fecha.

Caracterización de fachadas de doble piel, resueltas mediante el uso de chapas perforadas.

Desde el punto de vista de la caracterización mecánica y fluido dinámica se ha comprobado como el comportamiento de las chapas perforadas mejora cuando la unión con la fachada soporte se hace de forma rígida, es por ello que se puede plantear el análisis del comportamiento de este tipo de chapas dispuestas de forma similar a las correas de las fachadas de chapa, (correas en forma de z), esto es unidas mediante un solape en los puntos de apoyo, de cara a permitir un mejor comportamiento desde el punto de vista de la deformación, que es la principal característica de diseño de este tipo de elementos. Habría que buscar una solución que estéticamente no se vea afectada por este solape, ya que actualmente su estética es la principal razón por la que se coloca este tipo de fachadas. Habría que caracterizar la forma de realizar dicho solape y con ello su comportamiento frente al viento

En la caracterización fluidodinámica se ha mostrado como ya hay alguna investigación sobre la ventaja que presenta la disposición de este tipo de soluciones en la reducción de los valores de la presión del viento sobre la fachada, en edificios en altura, donde las aperturas verticales en la envolvente mejoran dicho comportamiento. Se podrían analizar diferentes tipologías de aperturas para establecer una serie de pautas de comportamiento frente a la presión del viento en diferentes ubicaciones.

Con relación a la caracterización acústica se ha planteado el comportamiento de este tipo de fachadas de doble piel con chapas perforadas, sin utilizar materiales que puedan mejorar la absorción acústica dispuestos sobre la fachada interior, de forma que se podría mejorar no solamente el confort acústico en el interior de los edificios, sino también en el exterior, con el objetivo de mejorar las condiciones de confort acústico en las calles de las ciudades, que principalmente en algunas zonas se alcanzan altos niveles de ruido, como pueden ser las zonas comerciales y las que se encuentran cerca de arterias principales de circulación.

En relación a la caracterización térmica, existe un campo que no se ha tratado en este trabajo de investigación y que sería necesario analizar en un futuro con objeto de completar el presente trabajo. Este estudio debería analizar las consecuencias de colocar una piel exterior de chapa perforada a modo de protección solar, incidiendo en su importancia respecto a la energía calorífica que penetra al interior de los edificios por los huecos de fachada. Y como afecta ello a las cargas térmicas interiores, o la necesidad de iluminación interior para poder obtener mediante simulaciones las cargas de climatización o los consumos de iluminación, pudiendo contrastar dichas simulaciones con los datos obtenidos de algún edificio monitorizado.

Respecto a la percepción visual se puede realizar un estudio a más largo plazo sobre personas que convivan habitualmente con este tipo de cerramientos de fachada, y diferentes grados de perforación para poder comprobar los efectos en el día a día, como la fatiga visual. Ya que el

trabajo realizado en la presente tesis ha consistido en que diferentes personas indiquen en un corto espacio de tiempo (escasos 5 minutos), cuál de las soluciones presenta una mejor percepción visual. Ninguno de los encuestados planteó que las chapas perforadas le generasen algún tipo de mareo, o sensación molesta, que quizás pueda ocurrir si se trabaja en el edificio durante un número elevado de horas. Y probablemente este tipo de estudio se debería de hacer por parte de especialistas en este campo.

Por último, en este sentido se puede plantear como una futura línea de investigación el análisis del comportamiento de diferentes patrones de perforación, ya que en este caso se ha centrado el estudio realizado en la solución más utilizada por los fabricantes de chapa perforada que es agujero circular y disposición a tresbolillo (R-T), pero existen otros patrones que se podrían analizar por si generan más beneficios en alguna de las líneas de la caracterización planteada en el presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO 10: BIBLIOGRAFÍA

10.1.- REFERENCIAS

-
- [001] Desarrollo sostenible. Transición hacia la coevolución Global
Luis M. Jiménez
Editorial Pirámide (2000) ISBN: 84-368-1355-3
-
- [002] CTE. Código Técnico de la Edificación
Real Decreto 314 de 2006
-
- [003] Fundamentos de construcción
Jaime Ferri Cortés, Vicente Raul Pérez Sánchez, Encarnación García González, María Asunción López-Peral
Editorial Club Universitario (2011) ISBN: 978-84-9948-350-4
-
- [004] La prefabricación en la construcción
Maurice Revel, Max Jacobson, Gonzalo de Navacerrada Farias
Urmo, S.A. de Ediciones (1981) ISBN: 84-314-0204-0
-
- [005] Optimización de la fachada de doble piel acristalada con ventilación natural. Metodología de diseño para el análisis de la eficiencia energética del sistema
Tesis Doctoral: Sánchez Salcedo, Eurne
E.T.S. Arquitectura (UPM).(2017)
-
- [006] Desarrollo urbano sostenible
Joaquín Arce Fernández
Areas metropolitanas de España: la nueva forma de la ciudad (2009), ISBN 978-84-8317-794-5, págs. 287-292
-
- [007] Shibam: Los rascacielos de adobe
El País, 19 agosto de 2015
https://elpais.com/elpais/2015/08/19/seres_urbanos/1439964000_143996.html
-
- [008] Fachadas de ladrillo visto
Fernando Martín Sanjuán, José L. Jiménez Sánchez-Malo
Cuadernos de los Amigos de los Museos de Osuna, ISSN 1697-1019, Nº. 11, 2009, págs. 107-111
-
- [009] El arquitecto y el diseño de paneles prefabricados de fachada
Ricardo Huete Fuertes
RE: revista de edificación, ISSN 0213-8948, Nº. 1, 1987, págs. 11-15
-

-
- [010] Teatro Agora / UNStudio + B + M
Plataforma arquitectura 03 enero 2011
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-68915/teatro-agora-unstudio>
-
- [011] Development and characterization of exterior Radiata-pine cladding for more sustainable and energy efficient façades in the Basque Country
Tesis Doctoral: Belinda Pelaz Sanchez
E.T.S. Ingeniería Bilbao (UPV/EHU).(2017)
-
- [012] Materiales traslúcidos. Vidrio, plástico, metal
Frank Kaltenbach
Editorial Gustavo Gili, S.L. (2016) ISBN: 84-252-2184-6
-
- [013] Arquitectura bioclimática
Jean-Louis Iazard, Marta Tusquets Trías de Bes, Alain Guyot
Gustavo Gili (1980) ISBN: 84-252-0981-1
-
- [014] Fachadas - cerramientos de edificios
Ana Sanchez-Ostiz Gutierrez
Universidad de Navarra 2012
-
- [015] La Fachada Dinámica
SomfyEspaña S.A. (2015)
-
- [016] El acero en la construcción
Verein Dutscher Eishüttenleute
Editorial reverté (2005) ISBN: 9788429120806
-
- [017] Euskal Autonomia Erkidegoan kokatuta eta EKT-a indarrean sartu baino lehen eraikitako bizitegi-eraikinetako fatxaden birgaitze jasangarrirako metodologia
Tesis Doctoral: Ziortza Egiluz Ellakuria
E.T.S. Ingeniería Bilbao (UPV/EHU).(2017)
-
- [018] EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS EDIFICIOS.
José María Fernández Salgado
AMV Ediciones (2011). ISBN: 9788496709713
-
- [019] Pielés nuevas: conceptos, capas, materiales.
SCHITTICH, Christian.
Detail, 2003; 196 páginas
-

-
- [020] Sensitivity study of an opaque ventilated façade in the winter season in different climate zones in Spain
 F. Peci López, M. Ruiz de Adana Santiago
 Renewable Energy, Volume 75, March 2015, Pages 524-533
-
- [021] Sistemas de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) para la Rehabilitación de la Envoltura Térmica de los Edificios
 Juan Martínez Estudio
 IDAE (2012) ISBN: 978-84-96680-59-3
-
- [022] Green façades to control wall surface temperature in buildings
 Giuliano Vox, Ileana Blanco, Evelia Schettini
 Building and Environment, Volume 129, 1 February 2018, Pages 154-166
-
- [023] Review and analysis of solar thermal facades
 Richard O’Hegarty, Oliver Kinnane, Sarah J. McCormack
 Solar Energy, Volume 135, October 2016, Pages 408-422
-
- [024] Double skin glazed facades in sunny Mediterranean climates
 Silvana Flores Larsen, Luis Rengifo, Celina Filippín
 Energy and Buildings Volumen 102 (2015) pages 18–31
-
- [025] Investigating the thermal behavior of double-skin perforated sheet façades: Part A: Model characterization and validation procedure
 Jesús M. Blanco, Pedro Arriaga, Eduardo Rojí, Jesús Cuadrado
 Building and Environment, Volume 82, December 2014, Pages 50-62
-
- [026] Kinetic architecture: designs for active envelopes.
 FORTMEYER, Russell
 Mulgrave: Images Publishing Group, (2014); 221 páginas
-
- [027] Interactive movement in kinetic architecture
 OSAMA YOUSSEF, Elkhayat.
 Journal of Engineering Sciences Assiut University, vol 42, nº3 (2014), pages . 816-845
-
- [028] Norma Básica de la Edificación- Condiciones térmicas 1979.
 Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios
-
- [029] Real Decreto 1371/2007 de 19 de octubre, por el que se aprueba el Documento Básico "DB-HR Protección frente al ruido" del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. (BOE 23-octubre-2007).
-

-
- [030] Corrección de errores y erratas del Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. (BOE 25-enero-2008).
-
- [031] Orden VIV/984/2009 de 15 de abril, por la que se modifican determinados documentos básicos del Código Técnico de la Edificación aprobados por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, y el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre. (BOE 23-abril-2009).
-
- [032] Real Decreto 173/2010 de 19 de febrero, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, en materia de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad. (BOE 11-marzo-2010).
-
- [033] Real Decreto 410/2010 de 31 de marzo, por el que se desarrollan los requisitos exigibles a las entidades de control de calidad de la edificación y a los laboratorios de ensayos para el control de calidad de la edificación, para el ejercicio de su actividad.
-
- [034] Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.
-
- [035] Corrección de errores de la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo (BOE 08-noviembre-2013).
-
- [036] BOE la Orden FOM/588/2017, de 15 de junio, por la que se modifican el Documento Básico DB-HE "Ahorro de energía" y el Documento Básico DB-HS "Salubridad", del Código Técnico de la Edificación, publicado el 23 de junio de 2017.
-
- [037] Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. «BOE» núm. 27, de 31 de enero de 2007, páginas 4499 a 4507 (9 págs.)
-
- [038] Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. «BOE» núm. 89, de 13 de abril de 2013, páginas 27548 a 27562 (15 págs.)
-
- [039] Real Decreto 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía. «BOE» núm. 38, de 13 de febrero de 2016, páginas 11655 a 11681 (27 págs.)
-
- [040] Energy assessment and optimization of perforated metal sheet double skin façades through Design Builder; A case study in Spain
Jesús M. Blanco, Aiert Buruaga, Eduardo Rojí, Jesús Cuadrado, Belinda Pelaz
Energy and Buildings, Volume 111, 1 January 2016, Pages 326-336
-

-
- [041] Advanced building skin
 Marco Casini
 Book Chapter. Smart Buildings. (2016)
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100635-1.00006-X>
-
- [042] The effects of a double-skin *façade* on the cladding pressure around a tall building
 Gang Hu, Jie Song, Sina Hassanli, Robert Ong, K. C. S. Kwok
 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 191, August 2019,
 Pages 239-251
-
- [043] CTE. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Seguridad Estructural SE.
 Acciones en la Edificación.AE
 Real Decreto 314 de 2006
-
- [044] Análisis dimensional. Mecánica de Fluidos. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón.
 Universidad de Oviedo.
-
- [045] Mecánica de fluidos. Capa límite.
 Dr. Armando Gallegos Muñoz. (2009).
-
- [046] Transporte de fluidos. Mecánica de Fluidos.
 Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo
-
- [047] Turbulencia y capa límite. Mecánica de Fluidos.
 Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo
-
- [048] Normas GMP (Good Manufacturing Practices) es la denominación internacional de las
 Normas de Correcta Fabricación (NCF) de la Agencia Española del Medicamento y
 Productos sanitarios (AEMPS) son una trasposición de las europeas
-
- [049] Norma UNE-EN ISO 14644-4:2001 Salas limpias y locales anexos controlados. Parte 4:
 Diseño, construcción y puesta en servicio. (ISO 14644-4:2001)
-
- [050] El síndrome del edificio enfermo
 Ricardo Loaiza Cucalón
 Alternativas. ISSN: 1390-1915 Volumen. 15 (3) (2014) pages 62-67
-
- [051] Thermal performance of a double-skin *façade* exposed to direct solar radiation in the
 tropical climate of Malaysia: A case study
 Abdultawab M. Qahtan
 Case Studies in Thermal Engineering, Volume 14, September 2019, Article 100419
-

-
- [052] Assessment of the influence of façade location and orientation in indoor environment of double-skin building envelopes with perforated metal sheets.
J. M. Blanco, A. Buruaga, J. Cuadrado, A. Zapico
Building and Environment, Volume 163, October 2019, Article 106325
-
- [053] Review and analysis of solar thermal facades
Richard O’Hegarty, Oliver Kinnane, Sarah J. McCormack
Solar Energy Volumen 135 (2016) Pages 408–422
-
- [054] Assessment of sound insulation of naturally ventilated double skin facades
D. Urbán, N. B. Roozen, P. Zařko, M. Rychtáriková, C. Glorieux
Building and Environment, Volume 110, December 2016, Pages 148-160
-
- [055] Acoustic behavior of orifice *plates* and perforated *plates* with reference to low-frequency sound absorption
M. Salikuddin
Journal of Sound and Vibration, Volume 139, Issue 3, 22 June 1990, Pages 361-381
-
- [056] Acoustic characterization of additive manufactured perforated panel backed by honeycomb structure with circular and non-circular perforations
Deepak C. Akiwate, Mahendra D. Date, B. Venkatesham, S. Suryakumar
Applied Acoustics Volumen 155 (2019) pages 271–279
-
- [057] Load characteristics and operation strategies of building integrated with multi-story double skin facade
Jaewan Joe, Wonjun Choi, Hansol Kwon, Jung-Ho Huh
Energy and Buildings Volumen 60 (2013) pages 185–198
-
- [058] The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz
Jukka Keränen, Jarkko Hakala, Valtteri Hongisto
Building and Environment, Volume 156, June 2019, Pages 12-20
-
- [059] UNE-EN ISO 16283-3:2016
Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada. (ISO 16283-3:2016)
-
- [060] Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon
Elena Badino, Roberto Manca, Louena Shtrepi, Cristina Calleri, Arianna Astolfi
Building and Environment, Volume 157, 15 June 2019, Pages 242-256
-

-
- [061] GUÍAS PARA EL RUIDO URBANO
 Birgitta Berglund, Thomas Lindvall, Dietrich H Schwela
 Organización Mundial de la Salud (1995) Stockholm University y Karolinska Institute.
-
- [062] Acoustic screening effect on building façades due to parking lines in urban environments. Effects in noise mapping
 D. Montes González, J. M. Barrigón Morillas, L. Godinho, P. Amado-Mendes
 Applied Acoustics, Volume 130, 15 January 2018, Pages 1-14
-
- [063] Interactive kinetic *façade*: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes
 Building and Environment, Volume 165, November 2019, Article 106396,
Seyed Morteza Hosseini, Masi Mohammadi, Olivia Guerra-Santin
-
- [064] Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort
 Amir Tabadkani, Masoud Valinejad Shoubi, Farzaneh Soflaei, Saeed Banihashemi
 Automation in Construction, Volume 106, October 2019, Article 102857
-
- [065] Daylight glare: a review of discomfort indexes
 L. Bellia, A. Cesarano, G.F. Iuliano, G. Spada
 Visual Quality and Energy Efficiency in Indoor Lighting: Today for Tomorrow, Roma, Italia (2008)
<http://www.fedoa.unina.it/1312/>
-
- [066] Visual comfort assessment using high dynamic range images under daylight condition in the main library building of Institut Teknologi Bandung.
 K. Kurnia, D. Azizah, R. Mangkuto, R. Atmodipoero
 Procedia engineering, 234-239 (170) (2017), pp. 1877-7058,
 (doi:10.1016/j.proeng.2017.03.056)
-
- [067] Daylighting optimization in smart facade systems
 C.-S. Park, G. Augenbroe, T. Messadi
 Proceedings of the Eighth International IBPSA Conference (2003), pp. 2522-2708
 (doi:10.1.1.472.7157)
-
- [068] Impact of different control strategies of perforated curved louvers on the visual comfort and energy consumption of office buildings in different climates
 Daniel Uribe, Sergio Vera, Waldo Bustamante, Andrew McNeil, Gilles Flamant
 Solar Energy, Volume 190, 15 September 2019, ages 495-510,
-
- [069] ANSYS 16.0 Guia de usuario (2016)
-

[070] AFMG SoundFlow

<http://soundflow.afmg.eu/>

[071] Manual de ayuda DESING BUILDER

Arturo Ordoñez García

Editado por Sol-Arq - 2013

[072] EnergyPlus

<https://energyplus.net/>

[073] Catalogo se secciones de chapa perforada RMIG

<http://rmig.com/es#1>

[074] Analysis of the deformation of a perforated sheet under thermal and tension load using finite element method

Soo-Kil Park, Jeong Kim, Yu-Chul Chang, Beom-Soo Kang

Journal of materials processing Technology Volumen 113 (2001) pages 761–765

[075] Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries

André Alberto, Nuno M.M. Ramos, Ricardo M.S.F. Almeida

Journal of Building Engineering Volumen 12 (2017) pages 87–98

[076] Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis

Francesco Pomponi, Poorang A.E. Piroozfar, Ryan Southall, Philip Ashton, Eric. R.P. Farr

Renewable and Sustainable Energy Reviews Volumen 54(2016) pages 1525–1536

[077] TEORIA DE LA ELASTICIDAD

Stephen P. Timoshenko

Ediciones Urmo 1981

[078] Métodos de análisis para diseño mecánico

Rafael Avilés González

Bilbao: Publicaciones-Escuela Superior de Ingenieros, 2002. ISBN 84-95809-05-2

[079] Aplicaciones del método de los elementos finitos en ingeniería

Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica

Universidad Politécnica de Cartagena 2005 ISBN: 84-95781-62-X

-
- [080] The extended/generalized finite element method: An overview of the method and its applications,
T. P. Fries and T. Belytschko
International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 84, no. 3, pp. 253–304, 2010
-
- [081] Applied Finite Element Analysis
Larry j. Segerlind
Editorial: John Wiley and Sons. U.S.A (1984)
ISBN: 978-0471806622
-
- [082] Finite Element Analysis and Applications
R. Wait & A.R. Mitchell
John Wiley & Sons. London (1986)
ISBN: 978-0471906773
-
- [083] Página oficial programa Ansys:
<https://www.ansys.com/>
-
- [084] Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 16
de Huei-Huang Lee
Edita: SDC Publications; (2015)
ISBN: 978-1585039838
-
- [085] Método de los elementos finitos: Introducción a ANSYS
Pilar Ariza Moreno, Andrés Sáez Pérez
Editorial Universidad de Sevilla-Secretariado de Publicaciones (2016)
ISBN: 978-8447205554
-
- [086] Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures
Ted Belytschko, Wing Kam Liu, Brian Moran, Khalil Elkhodary
Editorial: John Wiley and Sons. 2013
ISBN: 9781118632703
-
- [087] The application of air layers in building envelopes: A review
Tiantian Zhang, Yufei Tan, Hongxing Yang, Xuedan Zhang
Applied Energy, Volume 165, 2016, Pages 707-734
-
- [088] Túnel de viento como herramienta de ensayo aerodinámico
Isaac Prada
ICAI (2006)
-

-
- [089] Measuring and estimating airflow in naturally ventilated double skin facades
F. Marques da Silva, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues
Building and Environment, Volume 87, May 2015, Pages 292-301
-
- [090] Wind tunnel tests on macro-porous structural elements: A scaling procedure
Davide Allori, Gianni Bartoli, Claudio Mannini
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 123, Part B,
December 2013, Pages 291-299
-
- [091] Constant Reynolds number turbulence downstream of an orificed perforated plate
Rui Liu, David S. -K. Ting, M. David Checkel
Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 31, Issue 8, August 2007, Pages 897-908
-
- [092] Beaufort Wind Force Scale
U.S. National weather service
https://www.weather.gov/jetstream/beaufort_max
-
- [093] Comparativa del comportamiento acústico entre fachadas multicapas ligeras y fachadas tradicionales
L. Ruiz, E. Delgado, Francisco Javier Neila González, S. Vega
Materiales de construcción, ISSN 0465-2746, Nº. 307, 2012, págs. 397-409
-
- [094] CTE. Código Técnico de la Edificación. "Documento Básico HR. Protección frente al ruido
-
- [095] Application of perforated sheets to improve the efficiency of reactive profiled noise barriers
Mahdiyeh Naderzadeh, Mohammad Reza Monazzam, Parvin Nassiri, Samaneh Momen Bellah Fard
Applied Acoustics, Volume 72, Issue 6, May 2011, Pages 393-398,
-
- [096] Percepción: Umbrales auditivos. Curvas de Wegel
<http://elruido.com/divulgacion/curso/umbrales.htm>
-
- [097] Manual del Ruido
Departamento de Construcción arquitectónica
Ayuntamiento de las Palmas de Gran Canaria, 2006.
-
- [098] Tratado fundamental de acústica en la edificación
Luis Jesús Arizmendi
Universidad de Navarra (1980) ISBN: 84-313-0659-9
-

-
- [099] Guía Acústica de la Construcción
Francisco J. Rodríguez Rodríguez, Javier De La Puente Crespo y César Díaz Sanchidrián
CIE (2008) ISBN: 978-84-96437-81-4
-
- [100] Medidas de ruido
Ramos Ridaó, Ángel
Universidad de Granada. Febrero 2009.
-
- [101] Manual de Documentación Técnica del 2250 Light
Brüel & Kjær, Diciembre 2008
-
- [102] Medida del coeficiente de absorción en el laboratorio de acústica para estudiantes de grado
Macho-Stadler, Erica; Elejalde-García, María Jesús.
TecniAcustica. A Coruña 2017 ISBN 978-84-87985-29-4
-
- [103] Fachadas ventiladas activas para reducir la demanda de calefacción en los edificios de oficinas. El caso de España.
O. Irulegi, A. Serra, R. Hernández, A. Ruiz-Pardo, L. Torres
Informes de la Construcción Vol. 64, pages 528, 575-585, (2012)
-
- [104] CTE. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE. Ahorro de energía. HE 1
Limitación de demanda energética.
-
- [105] Eficiencia energética de edificios residenciales
Marta Galindo, Roberto García y Jaime Pérez
Colegio Oficial de Arquitectos Técnicos de Cantabria 2013
-
- [106] State of the art of advanced solar control devices for buildings
Tilmann E. Kuhn
Solar Energy, Volume 154, 15 September 2017, Pages 112-133
-
- [107] Review of simulation modeling for shading devices in buildings
Ayca Kirimtat, Basak Kundakci Koyunbaba, Ioannis Chatzikonstantinou, Sevil Sariyildiz
Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 53, January 2016, Pages 23-49
-
- [108] ENERGY IN ARCHITECTURE: European Passive Solar Handbook
Alan J A Stewart; Timothy R New; Owen T Lewis
Commision of European Communities 1992
-

-
- [109] *Assessment of building façade performance in terms of daylighting and the associated energy consumption in architectural spaces: Vertical and horizontal shading devices for southern exposure facades.*

Alzoubi H., Al-Zoubi A.

Energy Conversion and Management, nº 51 (2010): 1592–1599.

- [110] *The impact of venetian blind geometry and tilt angle on view, direct light transmission and interior illuminance.*

Athanassios T.

Solar Energy, nº 82 (2008): 1172–1191.

- [111] Doble fachada en edificios: Concepto y Aplicación para Argentina

Leandro G. Heine, Guillermo D. Marshall.

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 6, Nº 1, 2002.

- [112] Thermal characteristics of a glazed transpired solar collector with perforating corrugated plate in cold regions

Wandong Zheng, Bojia Li, Huan Zhang, Shijun You, Tianzhen Ye

Energy, Volume 109, 15 August 2016, Pages 781-790

- [113] *The impact of changing solar screen rotation angle and its opening aspect ratios on Daylight Availability in residential desert buildings.*

Sherif A.H., Sabry H., Gadelhak.M.

Solar Energy, nº 86 (2012): 3353-3363

- [114] Energy assessment and optimization of perforated metal sheet double skin facades through Design Builder; A case study in Spain

Jesús M. Blanco, Aiert Buruaga, Eduardo Rojí, Jesús Cuadrado, Belinda Pelaz

Energy and Buildings Volumen 111 (2016) pages 326–336

- [115] Radiación solar y su aprovechamiento energético.

Miguel Pareja Aparicio

Marcombo (2010) ISBN-13: 9788426715593

- [116] Comparative investigation on building energy performance of double skin façade (DSF) with interior or exterior slat blinds

Dongsu Kia, Sam J. Cox, Heejin Cho, Jongho Yoon

Journal of Building Engineering Volumen 20 (2018) pages 411–423
