

# PROTOTIPO DE MURO CORTINA FB720 DISEÑO CON ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

<sup>1</sup>Wadel, G., <sup>2</sup>Alonso, P., <sup>3</sup>Zamora J., <sup>4</sup>Garrido, P.

<sup>1</sup>Societat Orgànica, <sup>2</sup>Universitat Politècnica de Catalunya, <sup>3</sup>b720 Arquitectos

Dirección postal: Europa 15, 2do 4ta, 08028 Barcelona  
gwadel@societatorganica.com

## RESUMEN

El proyecto de Fachada FB720 es una de investigación subvencionada por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) del Estado Español (IDI-20090761). Su objetivo es el diseño y desarrollo de una fachada ligera, modular tipo “unitized”, de bajo impacto ambiental y alta eficiencia energética, destinada principalmente a obras de rehabilitación o nueva construcción en el ámbito de la Península Ibérica.

Las estrategias técnicas para conseguirlo son: la reducción del consumo de materia, el uso de materiales renovables o reciclados y la optimización de las partes opaca y transparente como elementos de control solar.

El diseño de la fachada parte de una propuesta de b720 arquitectos y cuenta con la participación de diversas empresas y centros tecnológicos asesores. En el Análisis de Ciclo de Vida participó como asesora la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en colaboración con la asesoría ambiental Societat Orgànica. En la evaluación térmica y lumínica (que no se presenta en este documento a causa de su limitada extensión) participó la consultora JG Ingenieros.

Las características de la fachada FB720 han sido verificadas mediante la contabilización de su impacto ambiental en todas las fases del ciclo de vida, a través de simulaciones energéticas en fase de uso y mediante ensayos físicos realizados sobre diversos prototipos. Estos procesos han incluido, además, sucesivas acciones de rectificación y ajuste para la optimización del diseño.

Los primeros resultados han sido obtenidos comparando la fachada FB720 con dos alternativas estándar: ligera modular y convencional pesada. Estos resultados muestran que el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a producción de materiales, transporte, construcción, mantenimiento y desconstrucción son un 50% menores en el caso de la fachada FB 720. En cuanto a la evaluación lumínica y térmica, el ahorro de energía de la fachada FB720 en los espacios arquitectónicos inmediatamente en contacto con el cerramiento es al menos de un 10%, en diversas localizaciones climáticas y para diferentes niveles de carga interna.

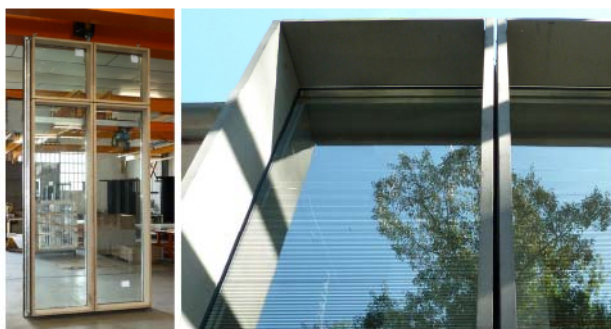


Fig. 1 “Imágenes del prototipo FB720 en dos de sus variantes”

Keywords: curtain wall, facade design, LCA, energy efficiency, materials impact

## 1.- Objetivo y objeto de estudio

El objetivo del proyecto FB720, desde el punto de vista ambiental, es alcanzar la máxima reducción de impactos posible a lo largo de un ciclo de vida de 50 años. Y ello tanto respecto de diferentes versiones de sí misma como en comparación con un muro cortina modular estándar (MCM) y una fachada pesada convencional (FPC). La fachada FB720 puede adoptar numerosas variantes que son producto de la combinación de materiales (montantes exteriores, aislamiento térmico, cerramientos interiores, etc.), tipos de vidrio (incoloros, estacionales, bajo emisivos, etc.), proporciones de la parte transparente del cerramiento (75% y 37%), separaciones entre ejes de montantes (60 y 120 cm). De tal forma, las comparaciones realizadas por el equipo asesor en ACV formado por el LiTA (Laboratori d'innovació i Tecnologia a l'Arquitectura) de la UPC i la asesoría ambiental Societat Orgànica (constituïda por Doctores y técnicos formados en esa universidad) son numerosas. En este documento se presenta una síntesis de ellas.

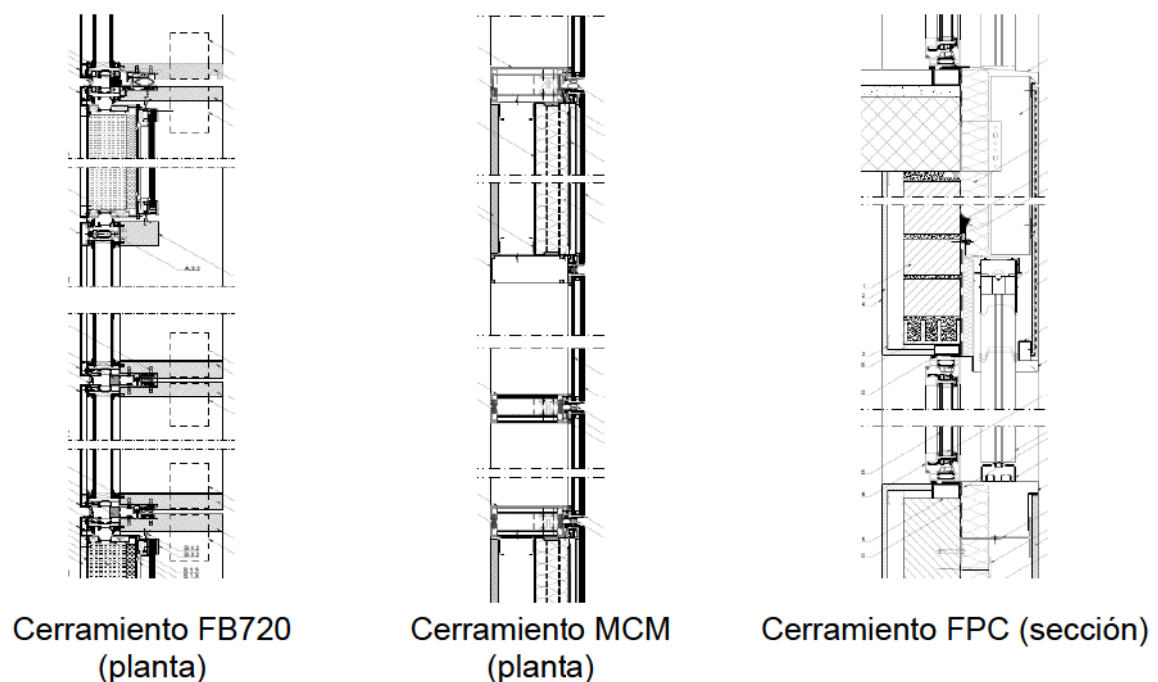


Fig. 2 "Detalles técnicos tipo de las diversas variantes consideradas"

## 2.- Metodología

La metodología que permitiría una valoración exhaustiva del impacto ambiental de los edificios o sus soluciones constructivas es el análisis de ciclo de vida ACV establecida por las normas ISO 14040/43, puesto que permite cuantificar el impacto medioambiental global realizando una contabilidad completa del consumo de recursos y de la emisión de residuos asociados al ciclo de vida total. No obstante, las metodologías y herramientas relacionadas con el ACV de los edificios no son suficientemente conocidas ni utilizadas entre los agentes del sector de la construcción: promotores, constructores, proyectistas, autoridades locales y propietarios de los edificios. La complejidad de su aplicación en una industria de las características de la construcción, el tiempo que requiere su desarrollo respecto de los plazos de realización del proyecto de los edificios y la elevada inversión económica que requeriría su aplicación en ellos con las herramientas y metodologías actualmente disponibles, que no se encuentran adaptadas a las características específicas del sector en España, hace que su implantación sea muy difícil.

A partir de ello los escasos estudios de ACV sobre edificios que se realizan en España han debido simplificar significativamente la metodología empleada así como realizar diversas adaptaciones y aproximaciones respecto de los datos disponibles en las fuentes de información, que en su mayoría proceden de otros países de Europa o del resto del mundo y tal como se ha dicho no pueden extrapolarse directamente a la situación local. Estos ACV habitualmente se realizan en base a unos pocos indicadores de impacto ambiental y profundizan el estudio sólo en las fases de extracción y fabricación de materiales, por una parte, y de uso y mantenimiento del edificio, por la otra. Los impactos de las fases de transporte a obra, construcción o rehabilitación del edificio, derribo y tratamiento final de los residuos o bien se estiman de forma global a partir de información estadística, otras evaluaciones realizadas, etc., o bien no se incluyen en el estudio por considerarse que su participación en el total del ciclo de vida tiene escasa relevancia.

A estos estudios simplificados se los conoce como ACV resumidos y resultan de gran utilidad para la evaluación tendencial del impacto ambiental –no así para su determinación con gran exactitud- de la edificación. Entre otras características que facilitan su aplicación en el sector, los ACV resumidos suponen un tiempo de realización de estudios más corto, unas menores cantidades de información necesaria para representar las fases del ciclo de vida y sus escenarios y, finalmente, y unos menores costes económicos ya que es posible realizar buena parte de ellos con herramientas y fuentes de información de libre disposición, de bajo coste, o de uso público.

Teniendo en cuenta que los resultados del trabajo fueron aplicados en el diseño del muro cortina a desarrollado, todos los planteamientos del ACV resumido que se propuso realizar mantienen una estrecha relación con las tecnologías y las fuentes de información disponibles y asequibles en la actualidad.

El ACV resumido que se llevó a cabo como soporte del diseño de la fachada FB720 tuvo en cuenta las siguientes consideraciones previas:

-Unidad funcional: 1 m<sup>2</sup> de fachada, con una vida útil de 50 años.

-Fases consideradas: producción de materiales [1], transporte [2], Construcción [3], mantenimiento [4], derribo y gestión final de residuos [5].

-Impactos evaluados: peso de los materiales [Kg/m<sup>2</sup>], consumo de energía [MJ/m<sup>2</sup>], y emisiones de CO<sub>2</sub> [KgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>]. En algunas fases también se incluyeron los parámetros residuos sólidos [kg/m<sup>2</sup>], material reciclado o renovable en el inicio del ciclo de vida [Kg/kg], material reciclable o compostable en el final del ciclo de vida [kg/kg] y toxicidad ambiental [ECA Kg/Kg].

-Asunciones y límites del procedimiento resumido: en [1] todas las operaciones de extracción y transporte de materias primas hasta la fábrica de materiales. El transporte desde éstas hasta la fábrica de muro cortina, así como las operaciones propias de fabricación y montaje de sus componentes. No se incluye la consideración de la intensidad material por unidad de uso (MIPS). En [2] la utilización de los combustibles empleados por los medios de transporte. No se tendrá en cuenta el ciclo de vida de vehículos ni infraestructuras. En [3] el uso de maquinaria que consuma energía (eléctrica, gasóleo, etc.). No se tiene en cuenta el gasto energético de la fuerza humana ni tampoco la amortización de medios auxiliares. En [4] operaciones de mantenimiento, sustitución parcial y total en el plazo de 50 años. En [5] el desmontaje del cerramiento hasta alcanzar el nivel de separación de los materiales que componen la solución constructiva y la gestión en los residuos no reciclables.

-Herramientas y bases empleadas: casi todos los cálculos se han realizado con la ayuda de hojas de cálculo estándar y sin la utilización de programas expertos. Las bases de datos sobre materiales consultadas han sido BEDEC PR/PCT del Institut

de Tecnología de la Construcción de Catalunya, ICE de la Universidad de Bath, EMPA del Consorcio de Universidades Públicas de Suiza, ELCD de la Unión Europea y en algunos casos ECOINVENT e IVAM mediante cálculos realizados con el programa SIMAPRO (obtenidos a partir de un proyecto de investigación del Centro de Iniciativas de la Edificación Sostenible) así como cálculos propios para la determinación del volumen y la densidad de los materiales que conforman las diferentes soluciones constructivas y de su peso específico. En cuanto a las operaciones de transporte y carga, así como la generación de residuos, se ha consultado el mismo banco PR/PCT, así como información proporcionada por fabricantes, otros estudios, cálculos y estimaciones propias.

En la conversión del consumo de energía (en KWh eléctricos o litros de gasoil) a emisiones de CO<sub>2</sub> fueron tenidos en cuenta los coeficientes de paso establecidos en los procesos de la certificación energética española. En el caso del material reciclado o renovable y reciclable o compostable, cálculos propios así como información proporcionada por fabricantes o terceras partes.

### 3.- Resultados del ACV resumido

A continuación se presenta una síntesis de la evaluación y resultados de impacto ambiental a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida de los tres tipos de fachada estudiados (FB720, MCM y FPC).

#### 3.1.- Extracción y fabricación de materiales

Se presentan las cuatro variantes de FB720 que obtuvieron los mejores resultados desde el punto de vista ambiental. Son las conformadas por vidrio normal de control solar [I], 37% de superficie transparente [37], 120 cm entre ejes de montantes [120] y cuatro combinaciones de materiales: madera laminada, lana de oveja, tablero aglomerado, papel kraft [A, materiales naturales renovables], PVC reciclado, fibra textil reciclada, tablero fibra-yeso, EPDM [B, materiales industriales reciclables], madera con polímeros lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft [C, híbrido de materiales naturales e industriales] y hormigón con fibras, lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft [D, híbrido de materiales naturales e industriales]. Las gráficas siguientes presentan los resultados obtenidos en peso, energía y emisiones de CO<sub>2</sub> para estas alternativas, así como una comparación entre ellas, en la que destaca como A/I/37/120 con los impactos ambientales más bajos.

Fachada	Kg/m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>	KCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
<b>A/I/37/120</b>	<b>53,99</b>	<b>1348,37</b>	<b>98,97</b>
<b>B/I/37/120</b>	72,17	1387,02	116,94
<b>C/I/37/120</b>	65,22	1656,99	106,27
<b>D/I/37/120</b>	84,50	1516,48	127,87

Fig 3. “Tabla de resultados comparados de los impactos ambientales entre alternativas FB720”

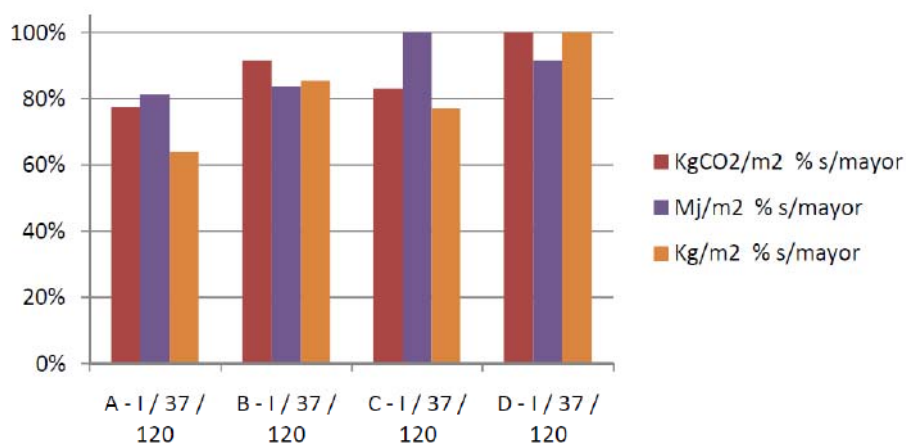


Fig 4. “Gráfica de resultados comparados de los impactos ambientales entre alternativas FB720”

En el otro extremo, las variantes de FB720 que más impacto ambiental concentran son la C/III/75/60 (madera con polímeros lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft, vidrio de control estacional y bajo emisivo, 75% transparente y montantes cada 60 cm) con 89,66 Kg/m<sup>2</sup>, 2284,01 MJ/m<sup>2</sup> y 149,16 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> y la D/III/37/60 (hormigón con fibras, lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft, vidrio de control estacional y bajo emisivo, 37% transparente y montantes cada 60 cm) con 120,81 Kg/m<sup>2</sup>, 2027,01 MJ/m<sup>2</sup> y 182,39 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. La diferencia entre las variantes de impacto más bajo y más alto, producto de las posibles combinaciones en materiales, vidrios, parte transparente y distancia entre montantes, es de hasta el 110% en peso, el 70% en energía y el 80% en emisiones de CO<sub>2</sub>.

Respecto de la comparación entre la nueva fachada FB720 y la de referencia MCM (muro cortina modular) y FPC (pesada convencional), teniendo en cuenta idénticas proporciones de parte vidriada pero no de separación de montantes (ya que en el caso MCM sólo se considera el rango de 120 cm), la alternativa FB720 de impacto ambiental inferior (A/II/37/120) respecto de la MCM muestra una reducción de un 67% en energía y un 81% en emisiones, mientras que para A/II/37/120 respecto de la FPC estos valores son de un 42% y un 61% respectivamente. Si en cambio, se compara la alternativa FB720 de impacto ambiental superior (C/III/75/60) las reducciones se sitúan en 45% en energía y 72% en emisiones respecto de la fachada MCM y en 2% en energía y 42% en emisiones respecto de la fachada FPC.

Fachada	Kg/m <sup>2</sup> %	MJ/m <sup>2</sup> %	KCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> %
<b>FB720 A/I/37/120</b>	53,99 100%	1.348,37 100%	98,97 100%
<b>MCM I/37/120</b>	59,21 110%	4.111,32 305%	525,94 531%
<b>FPC 37/120/C</b>	121,82 226%	2.327,18 173%	255,49 258%
<b>FB720 C/III/75/60</b>	89,66 166%	2.284,01 169%	149,16 151%

Fig 5. “Tabla de resultados comparados de los impactos ambientales, entre alternativas FB720, MCM y FPC”

### 3.2.- Transporte

Para esta evaluación se consideró la localización de una obra en Madrid, por tratarse de una ciudad central en el territorio español y se tuvo en cuenta que el taller de fabricación de la fachada se encuentra en Olot, (Girona). Para el resto de

localizaciones (fábricas de materiales, almacenes, distribuidores), habida cuenta de la dificultad de su determinarlas para todos y cada uno de los materiales (la selección de un proveedor suele depender del precio, las condiciones de pago, la disponibilidad, la logística de transporte, etc., y no de la optimización de movimientos) se tuvieron en cuenta las distancias habituales de transporte de materiales determinadas en *Wege zum Gesunden Bauen*, Holger König, 1985, Ökobuch. De acuerdo a los distintos materiales que intervienen en las distintas variantes de la fachada FB720 se modificaron las distancias, pesos, embalajes, densidad de transporte, etc. Los medios de transporte considerados, con alguna excepción, son camiones de 16 toneladas con ocupación de carga estimada para cada recorrido (fábrica-almacén, almacén-obra, fábrica-taller de fachadas, taller de fachadas-obra, etc.) de acuerdo a la experiencia y a las consultas realizadas.

	GAS OIL Litros / m <sup>2</sup>	ENERGIA Mj / m <sup>2</sup>	EMISIONES Kg CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>
FB720 - A	2,44	102,71	8,19
FB720 - B	3,74	134,97	11,18
FB720 - C	2,50	105,50	8,41
FB720 - D	2,58	108,56	8,65
MCM	2,76	116,19	9,26
FPC	2,19	92,44	7,37

Fig 6. “Tabla de resultados de consumo de combustible, energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>”

Como conclusión parcial, se observa en los resultados mostrados que, a diferencia de lo que ocurría en la fase anterior donde las diferencias eran más significativas, la energía y emisiones de transporte asociadas a cada fachada varían en menor grado. Aun así, las alternativas tipo A de FB720, basadas en materiales naturales, ligeros y locales, tienen un menor impacto ambiental entre los sistemas prefabricados. Los menores impactos se registran en el sistema FPC (montado “in situ”), a causa de la gran dispersión geográfica que presentan las localizaciones de fabricantes de materiales, taller y obra en los sistemas prefabricados (FB720 y MCM).

### 3.3.- Construcción

Para la determinación de impactos ambientales derivados de la aplicación de la medios auxiliares de obra necesarios para descargar, subir, acopiar, instalar, remover residuos, etc en la obra, así como los materiales de embalaje y la gestión de los residuos de la obra, ha sido necesario considerar que las diversas fachadas se construyen en un mismo edificio imaginario de 40 x 60 m en planta, con altura de planta baja más 8 plantas superiores y con 3,50 m entre ejes de forjados. Las fachadas FB720 y MCM, por ser ambas prefabricadas y modulares, presentan unos impactos prácticamente idénticos. En el caso de la fachada FPC, cuya construcción tiene lugar mayoritariamente pie de obra, el impacto ambiental ha sido calculado a partir de las diferentes partidas de obra que la conforman.

Fachada	Localización	Concepto	MJ/m <sup>2</sup> %	KCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> %	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
FB720 y MCM	Prefabricación	taller fachadista	2,94	0,53	
		Obra	maquinaria eléctrica	2,41	0,43
		maquinaria a gas-oil	4,10	0,33	
		materiales de embalaje	4,41	0,53	
		gestión de residuos	0,28	0,02	
		total	<b>14,14</b> 100%	<b>1,84</b> 100%	<b>0,00</b>
FPC 37/120/C	Obra	maquinaria eléctrica	33,58	6,05	
		maquinaria a gas-oil	40,08	3,20	
		materiales de embalaje	14,00	1,68	
		gestión de residuos	0,11	0,01	0,14
		total	<b>87,77</b> 621%	<b>10,94</b> 594%	<b>0,14</b>

Fig 7. “Cuadro de resultados de impactos ambientales, alternativas modulares (FB720 y MCM) y FPC”

Los resultados expuestos en el cuadro anterior evidencian grandes diferencias de impacto entre el grupo superior de las fachadas prefabricadas y el grupo inferior de la fachada de construcción in-situ, tanto en consumo energético como en emisiones de CO<sub>2</sub>. En el primer grupo se registran valores de hasta seis veces inferiores que los del segundo grupo. Respecto de los residuos sólidos, la generación a pie de obra es tan baja en los sistemas prefabricados, respecto de la construcción in-situ, que los valores de este grupo no alcanzan a ser reflejados en el cuadro.

### 3.4.- Mantenimiento

Esta es la fase con mayor duración a lo largo del ciclo de vida establecido (50 años), valor del período de tiempo que predomina en este tipo de estudios y que por tanto permite la comparación entre ellos. Sin embargo es preciso reconocer que la vida útil de un muro cortina estándar ronda los 35 años. Esta diferencia entre la vida útil teórica y la real hace que, a efectos de este estudio, deba considerarse una primera etapa que transcurre desde la construcción hasta los 35 años, en la que se realizan trabajos de mantenimiento como el resellado de juntas de estanqueidad (a los 20 años) en todas las fachadas. Y una segunda etapa que transcurre desde los 35 hasta los 50 años, en que las fachadas prefabricadas modulares FB720 (A/I/37/120) y MCM (I/37/120) son finalmente desmontadas, recuperados algunos de sus materiales (cuando es posible), y sustituidas por otras. En el caso de la fachada FPC construida in-situ, al llegar también a los 35 años de edad, se ha previsto la sustitución del revestimiento exterior, las oberturas y la parte correspondiente del cerramiento interior indirectamente afectada por estas operaciones. En la figura 7 se presenta una tabla resumen de estos cálculos.

Fachada	Concepto	MJ/m <sup>2</sup> %	KCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> %	Kg/m <sup>2</sup> %
FB720 (A/I/37/120)	mantenimiento de 0 a 35 años	25,20	1,28	0,00
	reposición de 35 a 50 años	677,62	60,36	22,36
	total	<b>702,82</b> 100%	<b>61,64</b> 100%	<b>22,36</b> 100%
MCM (I/37/120)	mantenimiento de 0 a 35 años	25,20	1,28	0,00
	reposición de 35 a 50 años	2.399,90	289,01	41,75
	total	<b>2.425,10</b> 345%	<b>290,29</b> 471%	<b>41,75</b> 187%
FPC 37/120/C	mantenimiento de 0 a 35 años	51,31	7,57	0,00
	reposición de 35 a 50 años	1.410,00	154,81	39,76
	total	<b>1.461,31</b> 208%	<b>162,38</b> 263%	<b>39,76</b> 178%

Fig 8. “Cuadro de resultados comparados de los impactos ambientales, entre alternativas FB720, MCM y FPC”

Existe una gran disparidad en los impactos de consumo energético, emisiones de CO<sub>2</sub> y residuos sólidos derivados de las operaciones de mantenimiento, entre las fachadas prefabricadas FB720 y MCM, especialmente en la sub-fase que transcurre entre los 35 y 50 años. Esto es así porque en ese momento el cerramiento debe desmontarse y reponerse, convirtiéndose en residuo muchos materiales que podrían reutilizarse o reciclarse, sobre todo en el caso de MCM. La diferencia entre ambas fachadas prefabricadas es entre 1,9 y 3,5 veces superior para la MCM según el impacto de que se trate. Respecto a la evaluación de la fachada FPC de construcción in-situ, los valores obtenidos la sitúan en una posición intermedia, aunque respecto de la FB720 sus valores aún son entre 1,8 y 2,6 veces superiores, según el indicador que se considere.

### 3.5.- Derribo / Desconstrucción

En esta fase del ciclo de vida se contemplan todas las operaciones de desmontaje, en el caso de las fachadas prefabricadas modulares FB720 y MCM, y de derribo en el caso de la fachada FPC construida in-situ.

Fachada	Concepto	MJ/m <sup>2</sup> %	KCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> %	Kg/m <sup>2</sup> %
FB720 (A/I/37/120)	desmontaje y retirada	9,27	0,67	
	centro de reciclaje	2,94	0,53	
	gestión de residuos	0,15	0,39	9,38
	<b>total</b>	<b>12,36 100%</b>	<b>1,59 100%</b>	<b>9,38 100%</b>
MCM (I/37/120)	desmontaje y retirada	9,27	0,67	
	centro de reciclaje	2,94	0,53	
	gestión de residuos	4,48	1,60	31,24
	<b>total</b>	<b>16,69 135%</b>	<b>2,80 176%</b>	<b>31,24 333%</b>
FPC 37/120/C	desmontaje y retirada	33,95	6,59	
	centro de reciclaje	0,00	0,00	
	gestión de residuos	1,72	4,61	109,80
	<b>total</b>	<b>35,67 289%</b>	<b>11,20 705%</b>	<b>109,80 1171%</b>

Fig 9. "Cuadro de resultados comparados de los impactos ambientales, entre alternativas FB720, MCM y FPC"

Existe una gran disparidad en los impactos de consumo energético, emisiones de CO<sub>2</sub> y residuos sólidos entre las fachadas prefabricadas FB720 y MCM, especialmente en la sub-fase de gestión de residuos. Esto es así, especialmente en el caso MCM, porque muchos materiales que podrían reutilizarse o reciclarse se convierten en residuos, extendiéndose su impacto ambiental más allá del desmontaje inicial hasta alcanzar las operaciones de gestión final de los mismos. Esta fase de gestión final actúa como una fuerte penalización ya que, en el caso FB720, los materiales reutilizables o reciclables acaban su contabilización como impactos cuando son desmontados y sus componentes inician un nuevo ciclo de vida de modo que, desde el punto de vista de ACV sus impactos no repercuten sobre el ciclo que ya ha acabado. La diferencia entre las fachadas prefabricadas FB720 y MCM es entre 1,3 y 3,3 veces superior para la MCM según el impacto. La fachada FPC de construcción in-situ es, en esta fase, la más impactante de todas, especialmente porque el coste energético de su demolición es muy superior al de una desconstrucción y porque además genera mayores cantidades de residuos no reutilizables ni reciclables. Respecto de la fachada FB720 sus valores de impacto son entre 2,9 y 11 veces superiores, según el indicador.



### 3.6.- Ciclo de vida completo

La suma de los valores obtenidos para todas las fases del ciclo de vida permite obtener unos resultados totales que proporcionan una visión global del comportamiento de cada sistema de fachada y sus variantes, así como también detectar en qué fases del ciclo se producen las principales desviaciones. A continuación se presentan los resultados totales comparando las cuatro alternativas de la fachada FB720: [A], [B], [C] y [D] con vidrios tipo I (normal de control solar), 37% de parte transparente y separación entre montantes de 60 cm.

FB720 ( II/37/120 )	EXTRAC. - FABRIC.		TRANSPORTE		CONSTRUCCIÓN		MANTENIMIENTO		DESMONTAJE		TOTAL	
	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>
ALTERNATIVA A	1.447,50	107,41	102,71	8,19	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.273,08	178,64
ALTERNATIVA B	1.486,15	125,38	134,97	11,18	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.343,99	199,60
ALTERNATIVA C	1.756,12	114,71	105,50	8,41	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.584,49	186,16
ALTERNATIVA D	1.615,61	136,31	108,56	8,65	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.447,04	208,00

Fig 10. "Tabla de resultados de impactos ambientales de la fachada FB720 en todas las fases consideradas"

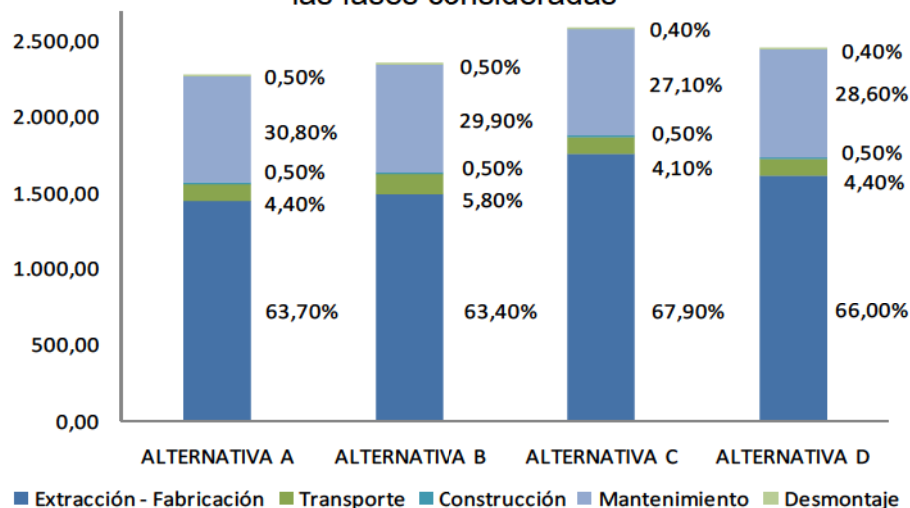


Fig 11. "Gráfica de resultados agregados de energía (MJ/m²) de la fachada FB720"

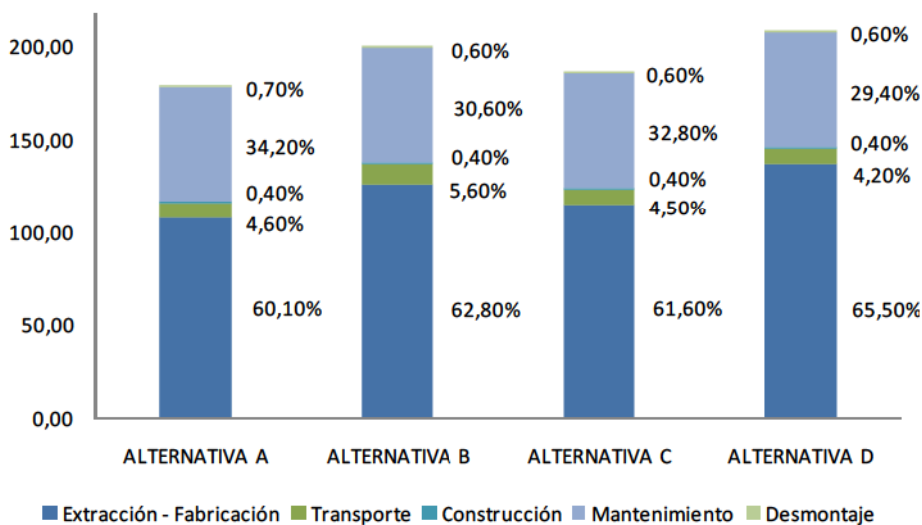


Fig 12. "Gráfica de resultados agregados de emisiones de CO<sub>2</sub> (KgCO<sub>2</sub>/m²) de la fachada FB720"

Se observa que la alternativa A/II/37/120, formada principalmente por materiales naturales renovables, tiene el mejor comportamiento ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida, tal y como se apuntaba en la fase de extracción y fabricación de materiales). También puede observarse que la mayor parte del impacto ambiental se concentra en las fases de extracción y fabricación de los materiales (rango entre 60% y 66%) y de mantenimiento (rango entre 27% y 34%).

FACHADAS	EXTRAC. - FABRIC.		TRANSPORTE		CONSTRUCCIÓN		MANTENIMIENTO		DESMONTAJE		TOTAL	
	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	Mj / m <sup>2</sup>	KgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>
FB720 (A - II/37/120)	1.447,50	107,41	102,71	8,19	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.273,08	178,64
MCM (MCM 1/37/120)	4.210,74	534,40	116,19	9,26	11,99	0,75	2.422,17	289,76	15,07	2,38	6.776,16	836,55
FPC (37/120/C)	2.327,18	255,49	92,44	7,37	94,52	10,52	1.461,31	162,38	36,27	11,25	4.011,72	447,01

Fig 13. "Tabla de resultados agregados de los impactos ambientales de las fachadas FB720, MCM y FPC"

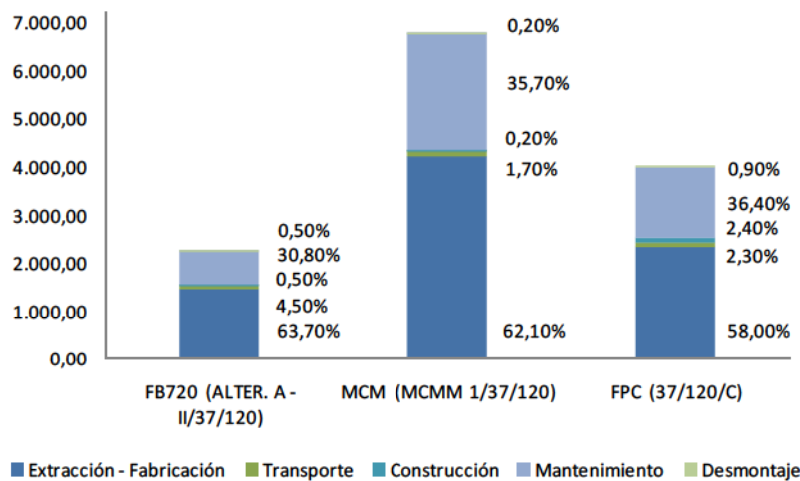


Fig 14. "Gráfica de resultados agregados de energía (MJ/m<sup>2</sup>) de la fachadas FB720, MCM y FPC"

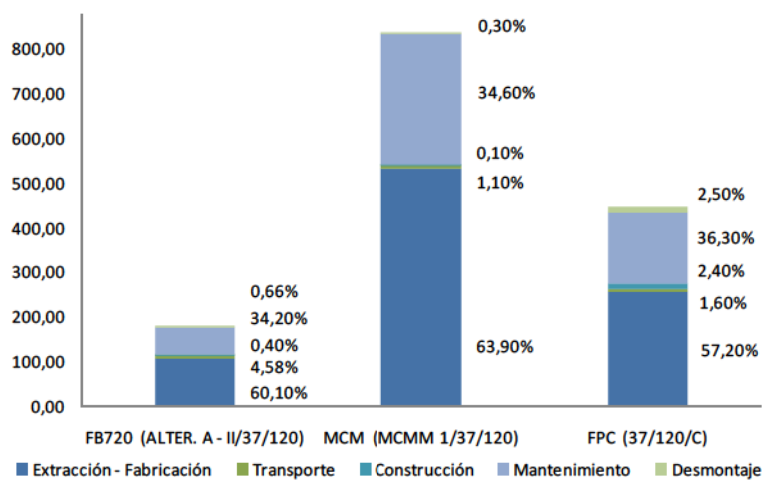


Fig 15. "Gráfica de resultados agregados de emisiones de CO<sub>2</sub> (KgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) de la fachadas FB720, MCM y FPC"

En cuanto a energía y emisiones de CO<sub>2</sub>, tal como se ha venido manifestando a lo largo de las diversas fases estudiadas del ciclo de vida, también se evidencian diferencias notables entre los impactos ambientales de la fachada FB270 con respecto a las de referencia, MCM y FPC. La fachada FB720, en su mejor variante, consigue una reducción de los indicadores de consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>, del orden de 2 a 1 cuando se la compara con la FPC y de 3 a 1 cuando se la compara con la MCM. La gran repercusión de las fases de extracción y fabricación de materiales, en primer lugar, y de la fase de mantenimiento, en segundo lugar, se mantiene cuando se comparan los diversos sistemas de fachadas considerados, tanto sean prefabricados como contruidos in-situ.

Por lo que respecta al impacto de los residuos sólidos (aquellos materiales que no admiten ni reciclaje ni compostaje y que tienen su destino final en un vertedero), también se ha realizado una comparación entre las cuatro variantes de la fachada FB720 así como las correspondientes a las de referencia MCM y FPC. Las fases consideradas en el ACV han sido todas, a excepción de la fase de transporte puesto que en ella no se producen residuos sólidos (al menos no en forma directa) sino principalmente emisiones a la atmósfera. Es importante tener en cuenta que, habida cuenta de la falta de de datos públicos consultables sobre generación de residuos en todas las fases y sistemas considerados, los valores han sido calculados a partir de información de bases de datos (IVAM, BEDEC, etc.), fabricantes, bibliografía, materiales asimilables y estimaciones propias. Los resultados, por tanto, no deben considerarse exactos sino representativos de tendencias.

Fachada	Fabricación <sup>1</sup>	Construcción <sup>2</sup>	Mantenimiento <sup>3</sup>	Derribo <sup>4</sup>	Total	%
FB720 A/I/37/120	9,2	3,11	22,36	9,38	44,05	100%
FB720 B/I/37/120	11,29	3,11	22,36	9,38	46,14	105%
FB720 C/I/37/120	26,19	3,11	22,36	9,38	61,04	139%
FB720 D/I/37/120	12,68	3,11	22,36	9,38	47,53	108%
MMMM I/37/120	48,74	3,11	41,75	31,24	124,84	283%
FPC/37/120	33,04	9,68	39,76	109,8	192,28	437%

<sup>1</sup>Residuos de fabricación de materiales básicos, <sup>2</sup>Residuos de embalajes (FB720, MCM y FPC) y sobrantes de construcción (FPC), <sup>3</sup>Residuos no reciclables producto de la reposición parcial del cerramiento a los 35 años, <sup>4</sup>Residuos no reciclables producto de la desconstrucción o derribo del cerramiento a los 50 años.

Fig 16. “Tabla de resultados agregados de residuos (Kg/m<sup>2</sup>) para las fachadas FB720, MCM y FPC”

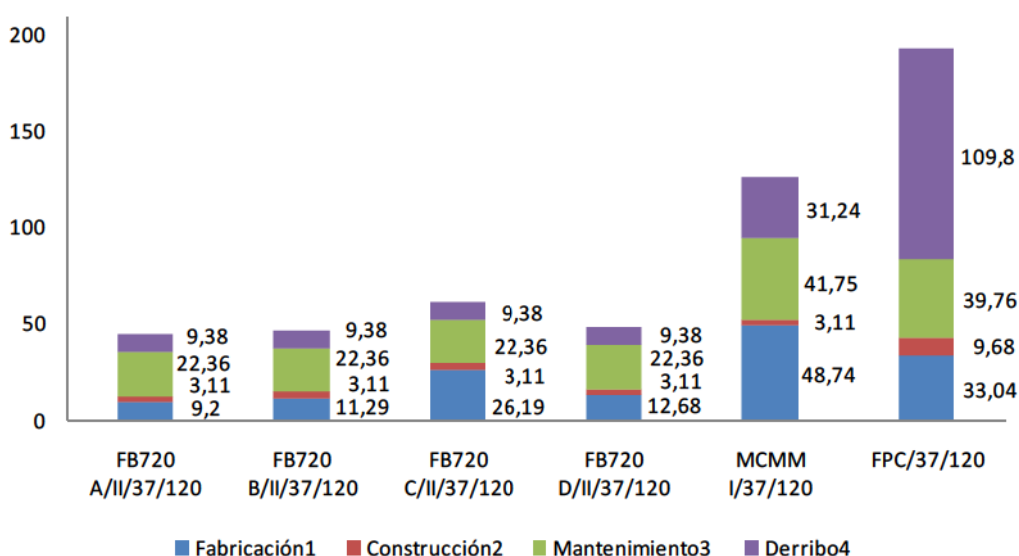


Fig 17. "Cuadro de resultados de resultados agregados de residuos (Kg/m<sup>2</sup>), fachadas FB720, MCM y FPC"

La información en forma gráfica da una idea clara de la repercusión de cada fase en el total de residuos de cada caso, así como también de la comparación relativa entre los distintos sistemas de fachada. Los valores más bajos, con una variación de hasta un 40% debida principalmente a la fase de producción de materiales, corresponden a los diferentes tipos de la fachada FB720. El cerramiento tipo MCM se sitúa en un segundo nivel, doblando en impacto a la fachada FB720 que más residuos genera. El nivel de superior, correspondiente al mayor impacto del conjunto, lo ocupa la fachada FPC que cuadruplica la media de la FB720 y supera por un 50% a la MCM.

#### **4.- Conclusiones del ACV resumido**

La aplicación de las estrategias ambientales definidas en la metodología del proyecto FB720 en el diseño de sus diferentes alternativas y por lo que respecta a los materiales y técnicas de construcción, ha permitido una reducción significativa de los impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida, tanto respecto de sí misma, en sus diferentes variantes, como en comparación con las fachadas de referencia MCM (convencional modular) y FPC (pesada convencional).

Las estrategias ambientales aplicadas a la selección de materiales han sido:

- Reducción de la cantidad de material por unidad de servicio.
- Sustitución de los materiales y sistemas con mayor impacto asociado.
- Utilización de materiales reciclados (industriales) y renovables (naturales).
- Potenciación de la rehabilitación (de materiales y componentes).
- Minimización de generación de residuos y gestión de los mismos para su reciclaje.
- Potenciación de la durabilidad y del bajo mantenimiento.
- Utilización de técnicas y materiales locales.

Las mejoras ambientales alcanzadas mediante esas estrategias han sido:

-Fase de toma de decisiones del proyecto: se han detectado factores técnicos que son decisivos en el control de los impactos ambientales y que no dependen directamente de los materiales empleados: por un lado la definición geométrica del sistema, como la separación entre montantes (cuanto más separados mejor) y la relación lleno/vacío (cuanto más alta mejor) y por otro lado la definición de los sistemas de unión que pueden facilitar el desmontaje.

-Extracción y fabricación de materiales: se confirma que la utilización de materiales naturales con baja intensidad de procesos industriales agregados, es la opción que menores impactos ambientales supone. En cuanto a los materiales que son comunes a todas las alternativas FB720 y que concentran más el impacto ambiental, aún en las mejores opciones de proyecto y teniendo en cuenta que las cantidades empleadas son significativamente menores que en las fachadas convencionales, siguen siendo el aluminio (aun siendo 100% reciclado), el vidrio y los materiales de síntesis (juntas, intercalarios entre vidrios, etc.).

-Transporte: los materiales aplicados a la construcción de una fachada, sea cual fuere esta, actualmente se desplazan a lo largo de considerables distancias. Por ello considerar los flujos que ocasiona la localización de los talleres de prefabricación respecto de la ubicación de los proveedores de materiales y las obras es clave. Otro aspecto de gran importancia es la optimización de la capacidad de carga del medio de transporte, que en los recorridos entre almacén y obra no siempre se colmata. Por último se debe considerar la posibilidad de utilizar medios más eficientes de transporte que el camión, teniendo en cuenta para ello la relación kg transportado/energía consumida, como por ejemplo el tren.

-Construcción: en esta fase es cuando más evidentes se hacen las diferencias de impacto entre los sistemas prefabricados y los sistemas in-situ. Ello se debe a que en los prefabricados se hacen eficientes muchas operaciones al aplicar utillaje más completo permitiendo un menor consumo directo de materiales y una menor generación de residuos que, además, en taller pueden ser clasificados con mayor facilidad y, en consecuencia, reciclarse en mayor proporción. Cabe señalar el creciente impacto que suponen los materiales de embalaje (que se convierten en residuos nada más llegar a obra) pues representan una parte importante del coste energético y emisor de los sistemas constructivos: hasta un 30% y un 20% del total para los sistemas prefabricados (FB720 y MCM) e in-situ (FPC) respectivamente.

-Mantenimiento: En esta fase que comprende 50 años de duración (35 primeros años de mantenimiento y unos segundos 15 años tras la rehabilitación), las diferencias entre los distintos sistemas de fachada vuelven a ser notables. El orden según el mejor comportamiento ambiental comienza por la fachada FB720, sigue por la FPC y acaba con la MCM, pero con saltos importantes de valor entre las posiciones primera y segunda (incrementos de impacto entre 1,8 y 2,6 veces) y entre las posiciones primera y tercera (incrementos de impacto entre 1,9 y 3,5 veces). Ello se debe principalmente a las estrategias opuestas de selección de materiales que cada una de las opciones prefabricadas (FB720 y MCM) plantea: materiales naturales renovables e industriales reciclados así como separables y recuperables, en el caso FB720, y materiales industriales poco reciclados y frecuentemente no separables ni recuperables, en el caso MCM. Tales estrategias de partida en la selección de los materiales hacen que la reposición del cerramiento a los 35 años de edad represente un impacto equivalente a la construcción por vez primera.

-Demolición/desconstrucción: Además de la diferencia de trabajo mecánico necesario para las operaciones de derribo y desmontaje, cabe apuntar que cada uno de los sistemas comparados presenta diferencias respecto de la cantidad de residuos que se generan al final de su ciclo de vida. Mientras que el desmontaje de la fachada FB720 permite separar cómodamente los materiales reutilizables o reciclables, la desconstrucción de la fachada MCM y la demolición de la fachada FPC no permiten el mismo escenario de recuperación de recursos, ya que no han sido diseñadas para ello, aumentando su impacto ambiental.

La visión global de ciclo de vida permite comprobar que, tal como en muchos estudios ya se ha señalado, la industrialización en sí misma no supone directamente ventajas ambientales. Pero cuando el diseño de la solución constructiva (selección de los materiales, definición geométrica y determinación de las uniones) lleva implícita una adecuada gestión de los recursos para conseguir el cierre del ciclo de los materiales la cuestión cambia significativamente: la industrialización sí que permite reducir impactos en forma significativa respecto de la construcción convencional si está asociada a un diseño constructivo ambientalmente responsable.

## **5.- Análisis de sensibilidad y opciones adicionales de mejora**

Como parte del proceso de desarrollo de proyecto de las variantes constructivas de la fachada FB720 se estudiaron diversas opciones de reducción adicional de impacto ambiental, aplicables en cada etapa del ciclo de vida. Algunas de ellas, pese a su interés ambiental, finalmente no fueron incorporadas al diseño y producción del cerramiento debido a que presentaban dificultades técnicas (por ejemplo, sustitución de materiales que hubieran necesitado del desarrollo industrial), económicas (por ejemplo, rediseño de producto y proceso de fabricación) o de orden práctico (por ejemplo, relocalización de las plantas de fabricación). A continuación, siguiendo el orden de las fases del ciclo de vida, se presentan cinco alternativas de reducción de impacto ambiental (energía, emisiones de CO<sub>2</sub>, materiales, residuos, etc.) valoradas

en forma simplificada mediante el indicador de consumo de energía. Finalmente se valora la repercusión que supondría su incorporación en el sistema FB720.

-Fase de extracción-fabricación de materiales: cambio de algunos de los perfiles de aluminio por listones de madera laminada. El sentido de esta propuesta de mejora es reducir energía, emisiones y residuos de producción de materiales, dado que el aluminio 100% reciclado empleado aún presenta mayores niveles de impacto que la madera laminada. Redefiniendo el detalle constructivo y tomando como hipótesis la configuración de cerramiento A/II/37/120 se plantea la sustitución de hasta 2,2 kg/m<sup>2</sup> de aluminio por 3,07 Kg/m<sup>2</sup> de madera laminada.

-Fase de transporte: situar el taller de fabricación de fachadas lo más próximo posible a áreas de grandes ciudades que presenten una demanda potencial de instalación de muro cortina, tanto en sustitución como en obra nueva. Se plantea una reducción de consumo de combustibles utilizados por los camiones que se desplazan entre fábrica y obra, disminuyendo tanto la energía como emisiones de CO<sub>2</sub>. Se ha considerado una disminución de la distancia considerada en el estudio (750 Km desde Olot, donde se encuentra el taller de fabricación de fachadas, hasta Madrid, que es una de las localizaciones de las hipotéticas obras a atender) del orden de 10 a 1 (para ello el taller de fabricación se ha situado hipotéticamente en Toledo, manteniendo la obra en Madrid).

-Fase de construcción: materiales de embalaje 100% reciclables. En la puesta en obra del muro cortina modular FB720, casi no se generan residuos porque las operaciones constructivas se limitan a anclar el cerramiento a la estructura. Los residuos principales son, por tanto, los materiales empleados en el embalaje de los paquetes de paneles de fachada. Estos materiales suponen un doble impacto: el de su producción (extracción-fabricación) y el de su gestión como residuos (separación, carga, transporte y tratamiento final). Se plantea reducir el consumo de materiales de embalaje, gracias a su reutilización en el mayor número de ciclos posible, y eliminar la gestión de los residuos (gracias a que se reciclarían).

-Fase de mantenimiento: aumentar la vida útil de la fachada de 35 a 50 años. En este estudio se había tenido en cuenta el reemplazo casi total de los cerramientos a los 35 años. Los muros cortina construidos en los años '70, cuyos fallos principales son pérdidas de estanqueidad por deterioro de las juntas y unas escasas prestaciones de aislamiento térmico y protección solar, dan prueba de ello. La durabilidad de los muros cortina de reciente fabricación podría ser superior si los materiales elásticos de las juntas demostraran una vida útil mayor. La hipótesis es la equiparación de su durabilidad a la del resto de materiales, en 50 años.

-Desconstrucción: paneles de vidrio cámara desmontables y reciclables. La gestión de residuos del vidrio cámara, vidrio laminado y vidrios con impresiones, tintas, deposiciones, serigrafías, etc., es compleja. La composición y el tipo de juntas entre los distintos elementos que conforman los paneles, adheridas y por tanto no reversibles, impide recuperar los materiales originales. Gran parte del vidrio utilizado en construcción no se recicla sino que se infracicla (se tritura y se mezcla como carga en compuestos de calidad inferior). Con esta medida se intenta evitar los impactos de gestión de residuos y de producción de nuevos materiales.

Los resultados en el ciclo de vida de los diferentes ahorros que podrían alcanzarse con la incorporación de las medidas planteadas a la fachada FB720 puede observarse en el siguiente cuadro (la repercusión porcentual está hecha sobre el total de consumo energético del ciclo de vida, que es 2.278,08 MJ/m<sup>2</sup>).

<b>Medida de mejora</b>	<b>Ahorro (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>% ahorro s/total</b>
1. Sustitución de perfiles de aluminio por madera	65,00	2,85%
2. Taller de fachada próximo a la obra (75 Km)	71,40	3,13%
3. Embalaje reutilizable y materiales reciclables	3,43	0,15%
4. Vida útil de las juntas extendidas a 50 años	442,91	19,44%
5. Paneles de vidrio totalmente desmontables	204,90	8,99%
<b>Totales</b>	<b>787,64</b>	<b>34,57%</b>

Fig 18. "Cuadro de resultados de ahorro de impacto por mejoras en el ciclo de vida de la fachada FB720"

Aunque las medidas propuestas suponen grados de dificultad de puesta en práctica muy diferentes (no es lo mismo relocalizar un taller de fabricación de fachadas que desarrollar nuevos embalajes), se constata que existen oportunidades de mejora de gran repercusión y que, combinadas, pueden llegar hasta un tercio del total de la energía. Entre ellas, ordenadas de acuerdo con el potencial de ahorro que presentan y la facilidad de implantación, destacan las 4, 5 y 1.

## REFERENCIAS

- [1] Anderson et al. 2002. J. Anderson, D. Shiers, M. Sinclair, The Green Guide to Specification, Building Research Establishment & Blackwell Publishing, Bodmin, Reino Unido, 3ra edición, 2002 ISBN 063205961.
- [2] Ayunt. Madrid 2007. Catálogo de productos de bajo impacto ambiental para el mantenimiento y rehabilitación de los edificios (documento on line consultado en [www.munimadrid.es](http://www.munimadrid.es) en diciembre de 2007), Ayuntamiento de Madrid, España, 2007.
- [3] ARC 2006. Equipo técnico de la ARC, Revisió del Programa de Gestió de Residus de la Construcció a Catalunya 2004-2006 (documento), Agència de Residus de Catalunya, Generalitat de Catalunya, Barcelona, 2006
- [4] CIES 2001. Centre d'Iniciatives de l'Edificació Sostenible, Treballs de recerca previs per a la redacció del Llibre Blanc per a l'Etiquetatge Verd dels productes per a la construcció (doc. elect.), COAC, CAATB, UPC, ITEC, Institut Cerdà, financiamiento de la Generalitat de Catalunya, Barcelona, 2001.
- [5] Fullana, Puig, 1997. P. Fullana y R. Puig, Análisis de ciclo de vida, Rubes Editorial, Barcelona, 1997, ISBN 8449700701.
- [6] Hammond, Jones 2007, J. Hammond, C. Jones, Inventory of Carbon & Energy (ICE) (doc. elect.), University of Bath, Reino Unido, 2007.
- [7] Hegger et al. 2006. M. Hegger, V. Auch-Schwelk, M. Fuchs, T. Rosenkranz, Construction materials manual, Birkhäuser edition Detail, Munich, Alemania, 2006, ISBN 3764375701.
- [8] IBO 2008 IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und ökologie, Details for passive houses. Passivhausbauteilkatalog. A catalogue for ecologically rated constructions, Viena, Austria 1999, ISBN 3-211-29763-4.
- [9] ITeC TCQ 2006. Programa TCQ 2000 (versión 3.2), ITeC, Barcelona, España, 2006.
- [10] ITeC BEDEC 2006. Banco BEDEC PR/PCT (versión 2006), ITeC, Barcelona, España.
- [11] ITeC 1991 Equipo técnico del Àrea de construcció existent de l'ITeC, Manteniment de l'edifici. Fitxes, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona, 1991, ISBN 8478530304.
- [12] ITeC, COAC, UPC 1996 N. Casado et al., La Enseñanza de la Arquitectura y el Medio Ambiente. Programa Life, Colegio de Arquitectos, Instituto de Tecnología de la Construcción y Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1996.

- [13] Mañá et al. 2003 F. Mañá (Dir.), A. Cuchí, D. Castelló, G. Diez, A. Sagrera, Parámetros de sostenibilidad, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona, España, 2003, ISBN 8478534611.
- [14] McDonough, Branguart 2005. W. McDonough, M. Branguart, Cradle to cradle, Mcgraw-Hill Interamericana de España, Madrid, España, 2005.
- [15] Rieradevall, Vinyets 1999. J. Rieradevall, J. Vinyets, Ecodiseño y ecoproductos, Rubes Editorial, Barcelona, 1999, ISBN 84-497-0074-4.
- [16] Rieradevall et al. 2005. Joan Rieradevall (Dir.), Ecofanal. Ecodisseny d'elements urbans 2005-2006, Universitat Autònoma de Barcelona / Generalitat de Catalunya, Barcelona, España, 2005.
- [17] Oliva 2001. Jean Pierre Oliva, L'isolation ecologique, Terre vivante, Francia ISBN 2904082905  
Barcelona, España, 2007.
- [18] WRAP 2007. AMA research Ltd, Choosing construction products (catálogo), The waste & resources action programme WRAP, Oxon, Reino Unido, 2007.
- [19] WADEL 2009. La Sostenibilidad en la arquitectura Industrializada. La construcción modular ligera aplicada a la vivienda. Tesis doctoral. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2009. <http://www.tesisenred.net/handle/10803/6136>