

Aluminio Noble

Reflejo en la arquitectura moderna

Mihaela Ceban

Universidad Politécnica de Madrid

Aluminio Noble

Reflejo en la arquitectura moderna

Estudiante

Mihaela Ceban

Tutora

Rosa Bustamante

Departamieno de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas

Aula TFG 4

Jorge Sainz Avia, *coordinador*

Ángel Martínez Díaz, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

Enero 2019

“ Aluminio un metal que da alas al progreso”¹

¹ Frase recogida en el Folleto publicitario del Pabellón del Aluminio de 1954

Índice

Resumen	4
1. Introducción	5
I. Características del aluminio	
1.1. Materia prima del aluminio.....	7
1.2. Fabricación de aluminio	9
1.3. Propiedades del aluminio	13
II. Estructura de aluminio	
2.1. Pabellón centenario del aluminio de Jean Prouvé en París, 1954	19
2.2. Comedores para invitados y obreros de la Fábrica de automóviles Seat de Ortiz-Echagüe, Barbero Rebolledo y Joya Castro en Barcelona, 1956.....	23
2.3. Casa de aluminio de Toyo Ito en Tokio, 2000	25
2.4. Espuma de aluminio en la estructura	30
III. Envoltente de aluminio	
3.1. Museo de Bellas Artes de Mansilla y Tuñón en Castellón, 2000	32
3.2. Edificio Selfridges de Jan Kaplický y Amanda Levete en Birmingham, 2003	35
3.3. Iglesia Evangélica de Carlos y Lucía Ferrater en Terrassa, 2010	37
3.4. Louvre Lens de Sanaa en Lens, 2012	39
4. Conclusiones	42
Fuentes de las tablas e imágenes	43
Bibliografía	45

Resumen

El trabajo que se desarrolla trata del aluminio, de sus virtudes y sus debilidades. Se estudia las propiedades más relevantes con sus puntos altos y bajos, en particular, la importancia a sus aplicaciones, ya que es un material muy versátil en sus formas de fabricación. He estudiado con más detalle 6 proyectos arquitectónicos, que consideré más interesantes a lo largo de la historia, donde se había utilizado el aluminio como material constructivo. En 3 de ellos se ilustra la aplicación del aluminio en sus estructuras, lo que demuestra que este material tiene una cierta resistencia que le puede permitir ser usado con este fin. En los otros 3 en cambio, vemos ilustradas las aplicaciones del mismo en las envolventes de edificios. En los 6 proyectos me centré en analizar la forma de construir con aluminio y en las formas de uniones con la ayuda de los planos y documentación que he podido encontrar. He hecho énfasis en los detalles constructivos, ya que me pareció que era lo más interesante. En el caso de no haber encontrado suficiente información, me he basado en hipótesis de cómo podrían haber sido proyectados los edificios, según los textos que he leído.

Palabras claves: aluminio, laminado, extrusionado, moldeado, estructura, envolvente

1. Introducción

El aluminio es el metal más abundante que podemos encontrar en la corteza terrestre, y si miramos el gran progreso que ha tenido en los últimos años como material implementado en la construcción ocupa un lugar muy destacable. Su uso está en continuo aumento, llegando a ser hoy en día el metal más usado después del acero. Es un material relativamente nuevo, que en un principio marcó la modernidad a través de su empleo en la construcción de aviones y automóviles, y solo más tarde se emplearía también en la arquitectura. Se conoce su uso en la construcción desde hace unos 100 años, pero se ha desarrollado a gran velocidad y en tan poco tiempo podemos notar su potente presencia tanto en la construcción como en la vida cotidiana. La arquitectura actual está abordando el empleo del aluminio con gran agilidad generando nuevas expectativas sobre este material.

En el trabajo que desarrollo a continuación voy a tratar de averiguar los motivos por los cuales este material incrementó tanto su presencia en la arquitectura. La pregunta es si este material aportó ya todo lo que se esperaba de él o si aún quedan por descubrir cosas nuevas. ¿Cuál es su límite? ¿Se podrán prever nuevas aplicaciones del aluminio o no? Estas son algunas de las preguntas a las que buscaré dar respuestas en este trabajo. Procuraré estudiar como se comporta el aluminio tanto en el empleo de las envolventes de edificios si le afecta o no el clima del lugar y también cómo se comporta en las estructuras de los mismos, en qué contribuye ¿le puede hacer competencia al acero en un futuro como material estructural?. Me interesa estudiar los casos arquitectónicos que me parezcan más relevantes para poder destacar varias formas constructivas de su aplicación y por supuesto sus puntos favorables. Intentaré proponer alguna solución de cara a los procesos constructivos que puedan ayudar a mejorar o ampliar su aplicación en la arquitectura.

Parte I

Características del aluminio

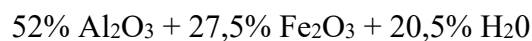
1.1. Materia prima del aluminio

El aluminio es el tercer elemento más común encontrado en la tierra, formando un 8% de su contenido. Este metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita (Fig. 1). Posee una gran cantidad de propiedades, así como gran variedad de aleaciones por las cuales se pueden modificar sus características. Es muy buen conductor de la electricidad y del calor, fácil de trabajar, aunque su producción tiene un coste alto respecto a otros materiales que se intenta reducir con el reciclaje. (15)

A principios del siglo XIX, la única forma de conseguir el aluminio era por procedimientos químicos con un gran coste y de pésima calidad. Y no fue avanzado el siglo XIX cuando, por medio de la electrólisis, se consiguió aislarlo en cantidades suficientes y con una pureza aceptable. (4)

Por todo ello, desde su descubrimiento a mediados del siglo XX su empleo en diferentes ámbitos de la construcción y la industria no ha hecho más que crecer exponencialmente en apenas 100 años. (4)

Por primera vez el nombre del aluminio sale a la luz en 1809 cuando Davy obtiene una aleación de hierro–aluminio al horno eléctrico. Más tarde en 1821 Berthier, mediante unos ensayos y análisis de laboratorio según examinaba una roca supuesta de mineral de hierro, tenía aproximadamente la composición:



Se trataba de una roca de bauxita, que recibió este nombre más tarde en 1847. La composición de las bauxitas tiene hidratado de alúmina: monohidrato $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ o trihidrato $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. (2)



Fig. 1 Roca de bauxita [10]

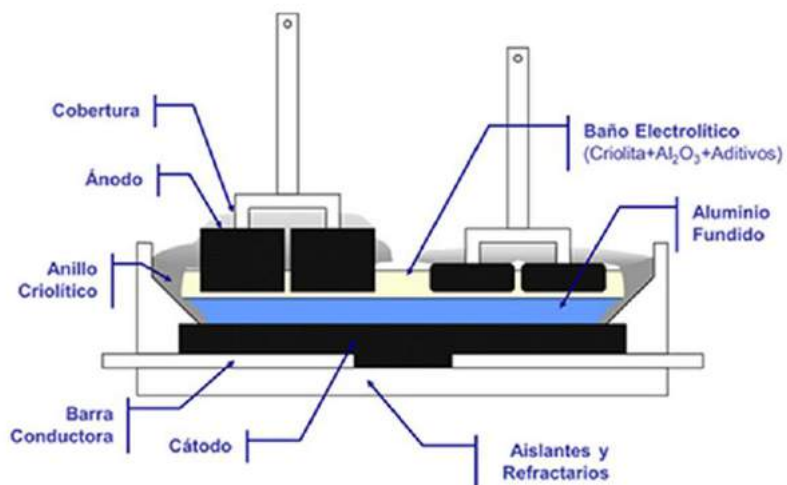


Fig. 2 Sección de una célula electrolítica [11]

En 1854 Henri Sainte – Claire Deville produce aluminio industrialmente, mejorando un proceso de laboratorio inventado por el alemán Friedrich Wöhler en 1825. Desde 1855 el aluminio se empezó a producir comercialmente y desde este momento dejó de ser un material precioso pues su precio cayó hasta un 90% en los 10 años siguientes. El desarrollo de la industria del aluminio químico alcanzó su punto culminante en 1886 en Gran Bretaña, con la aparición de un nuevo competidor, la Sociedad “Aliance Aluminium

Company”, cuando Héroult y Hall hallaron el método electrolítico, que continúa siendo la base de la producción industrial del aluminio hasta el día de hoy. Ambos descubrieron paralelamente que, si se disolvía el óxido de aluminio, la alúmina en un baño de criolita fundida y hacían pasar una corriente eléctrica a través de dicha disolución, el aluminio se depositaba fundido en el fondo del depósito, véase (Fig. 2). (2)

En 1889 Karl Josef Bayer invento el proceso Bayer de obtención de la alúmina a gran escala a partir de la bauxita (Fig. 3). Es un procedimiento siderometalúrgico de separación y extracción, muy eficaz y selectivo. Se basa en la extracción del hidróxido de aluminio, de la bauxita, a elevada temperatura y en la separación del residuo sólido una vez enfriada la suspensión, y a la precipitación parcial del hidróxido de aluminio a partir de la lejía tras la separación del hidróxido cristalizado. Según la zona de extracción se utilizan métodos distintos. Prácticamente la totalidad del mineral obtenido se convierte en aluminio en las fundiciones. Actualmente se tiene mucho interés por un óxido ligeramente calcinado como un contenido en Al_2O_3 menor que 30% y con una finura $<45 \mu m$. (2)

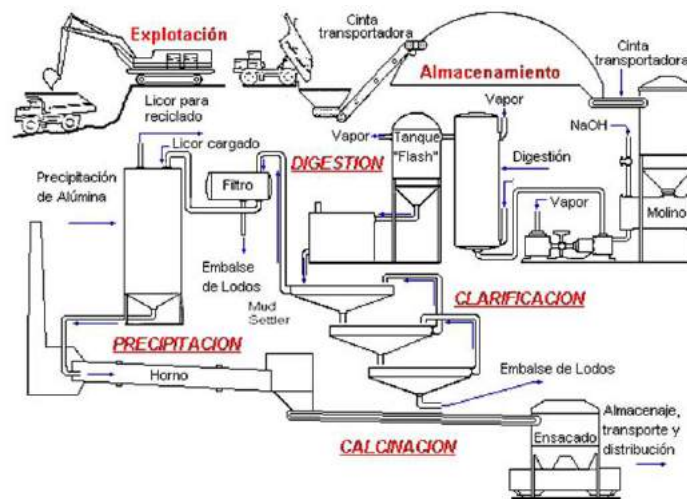
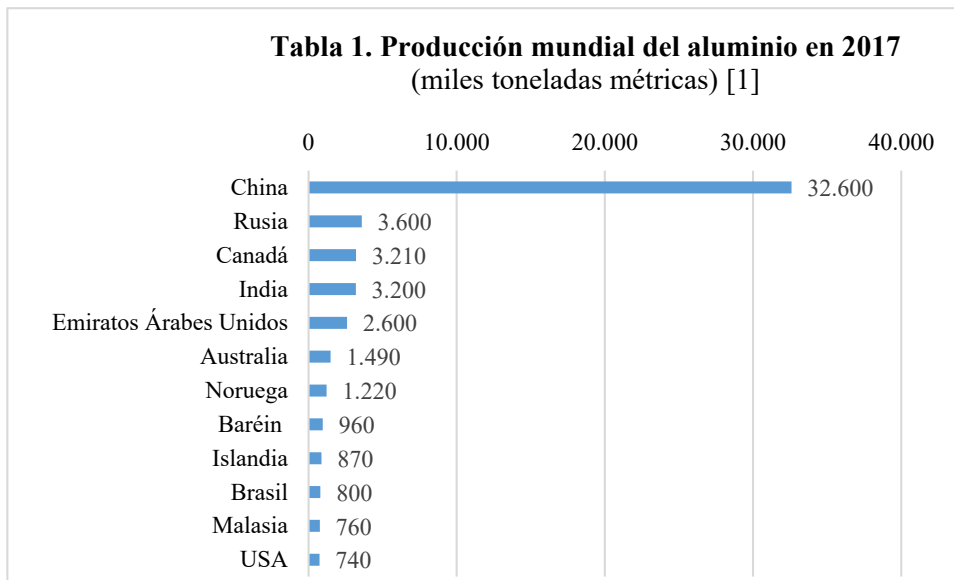


Fig. 3 Representación esquemática del proceso Bayer [12]

Se ha encontrado bauxita en todos los continentes pero las reservas más grandes están en Asia, América del Sur y Australia. Pero, actualmente la producción mundial de aluminio es liderada por China, como puede apreciarse en la (Tabla 1). En Europa las reservas de bauxita son más bajas, pero en Hungría igual que en Rumanía hablamos de unas reservas de 20.000.000 de t. En América del Sur en Barcarena, Brasil, se encuentra la productora de alúmina más grande del mundo, pero por razones de contaminación ambiental de los suelos y agua de los ríos tuvo que suspender sus operaciones en la refinera en marzo de 2018. La compañía propietaria noruega, Hydro Alunorte, posteriormente reanudó sus operaciones tras ser autorizada a utilizar un sistema de depósito de residuos de bauxita de última tecnología. (16)

Sin embargo, este problema de alta contaminación ambiental y de alto consumo energético en la explotación se ha visto altamente reducida por el reciclaje del aluminio. El consumo energético del mineral es de 165-260 MJ/kg, el aluminio reciclado a 50% se reduce a 80-95 MJ/kg y el reciclaje a 100% a 13-30 MJ/kg. Además, el reciclado produce el 5% de emisión de CO_2 en comparación con el proceso primario de producción a partir de la bauxita. (5)



1.2. Fabricación de aluminio

El aluminio es un material favorable desde el punto de vista de la fabricación, porque le podemos encontrar en muchas formas en cuanto a la producción. Esto lo vemos reflejado en la Tabla 2. En la industria del aluminio el concepto “semielaborado” comprende los productos laminados, planchas y bandas, así como los productos extrusionados y estirados (tubos, barras, perfiles, alambres) y piezas forjadas.

Tabla 2. Productos semielaborados [2]

Materiales	Plancha rollo	Plancha tratada	Cables clavos	Barras	Tubos	Sección laminada	Sección extruida	Moldeado	Otros semi acabados
Aluminio	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fundición				X	X			X	X
Acero	X		X	X	X	X		X	X
Acero inoxidable	X		X	X	X	X			
Acero corten	X		X	X	X	X	X		X
Acero galvanizado	X	X	X	X	X	X	X		X
Plomo	X				X			X	X
Zinc	X	X							
Cobre	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bronce	X			X		X	X	X	X
Latón	X		X	X	X	X	X	X	

Laminados

Los productos laminados suelen ser bandas que se pueden enrollar formando bobinas. Para la fabricación de chapas y bandas se parte básicamente de formatos fundidos que se someten a una laminación previa determinada, en caliente, y a continuación se laminan en frío. En las últimas décadas se introdujeron nuevos métodos de laminación mediante los cuales se han conseguido considerables mejoras en cuanto a la calidad y al aspecto económico. Las instalaciones modernas permiten la elaboración de formatos, con masa muy considerable, en trenes de laminación dúo, con alta capacidad de pasada y alta velocidad. Se puede obtener bandas laminadas en caliente con menor espesor entre 4 y 2,5 mm. Con las laminaciones en frío, en sistemas dúo, se pueden conseguir bandas bobinadas. A partir de estas bandas se obtienen las chapas cortadas a medidas. (1)

La *laminación en caliente* del aluminio puro y sus aleaciones se hace a partir del espesor de los lingotes, pero también se ajusta a las instalaciones disponibles y difiere según el material y la superficie de laminación. El espesor del lingote como punto de partida de laminación en caliente se selecciona de tal forma para poder conseguir tanto chapas gruesas como más finas. Cuanto más aleado es el material y más baja la temperatura de laminación, mayor es la compactación del material. La mayor dilatación térmica se produce en el centro de los cilindros laminadores, que conduce a una deformación más fuerte de la parte central de la pieza, pero se contrarresta mediante un ahuecamiento de los cilindros laminadores. En la Tabla 5 podemos ver cuáles son las tolerancias admisibles de espesores en chapas y bandas según las anchuras de las bandas para la laminación en caliente y también vemos que el espesor máximo para el cual cabe esperar una estructura suficientemente deformable es de 200mm. (1)

Para la *laminación en frío* se utilizan las bandas o chapas prelamadas en caliente que se laminan a temperatura ambiente hasta conseguir el espesor definitivo y según sea el grado de endurecimiento puede ser necesario un recocido intermedio antes de la laminación en frío. Para conseguir el estado de suministro duro se realiza el último recocido intermedio hasta que se consigue el espesor final y las características de resistencia mecánica prescritas. Y por último se pasa por un recocido logrado a bajas temperaturas que conduce al aluminio a un grado de dureza intermedia exigido. Se puede realizar también un recocido de estabilización en caso de aleaciones como AlMg y AlMgMn para evitar con el tiempo disminuciones de la resistencia. (1)

Las láminas de aluminio se fabrican principalmente a partir de aluminio puro, las que son de aluminio de mayor pureza o de aleaciones de aluminio se fabrican con márgenes de espesores más restringidos. Los fabricantes nos dan la información sobre las posibilidades de acabados y cantidades mínimas que pueden servir. Las láminas de aluminio hasta 0,01 mm de espesor tienen relativamente baja resistencia a tracción y alargamiento (Tabla 3).

Tabla 3. Resistencia mecánica y alargamiento en láminas y bandas delgadas [3]

	Espesor (μm)	Resistencia mecánica (N/mm^2)	Alargamiento de rotura l_0 (mm)
Al99,5	4 a 20	50 a 70	100
	21 a 100	55 a 65	100
	101 a 350	70 a 110	20
Al99	4 a 20	75 a 90	100
	21 a 100	60 a 80	100
	101 a 350	80 a 120	20

Las cantidades pequeñas inferiores a 1000 kg de una medida concreta se pueden suministrar solo en casos excepcionales. Las láminas de aluminio se suelen suministrar en rollos o bobinas con unas medidas fijas de anchura y longitud normalizadas según DIN 55 470 donde viene dado hasta el diámetro máximo como el peso. Estas láminas adheridas a poliuretano se usan como barrera de vapor y capa reflectante de revestimiento (véase Tabla 4). (1)

Tabla 4. Espesores de láminas y diferencias admisibles [4]

Uso principal	Espesor nominal μm	Campo de tolerancia μm	Masa referida a superficie g/cm ²	Longitud km			
				D	2	D	4,3
Papel de condensadores	4,5	3,8 – 4,8	11,9	bobina 120 mm	1,5	bobina 180 mm	4
	5	4,2 – 5,2	12,7		1,4		3,5
	6	5,3 – 6,3	15,65				
Hojas de Ennoblecimiento	8	7 - 8,5	20,93	D bobina 350 mm	11,9	D bobina 640 mm	32,5
	10	9 – 10,5	26,33		9,5		25
	13	11 – 12,5	34,42		7,2		18,5
	15	14 – 16	39,33		5,8		16
	20	18,5 – 21,5	54		4,9		12

Extrusionados

La extrusión es el procedimiento de conformación más importante para la fabricación de semielaborados de aluminio. Por el procedimiento de extrusión se fabrican barras, tubos y perfiles. En comparación con el perfilado por laminación, el extrusionado tiene más posibilidades de conformación y de espesores. En la (Tabla 5) podemos ver los espesores mínimos para este tipo de productos. (1)

Tabla 5. Espesores mínimos de pared en perfiles extrusionados en prensas [5]

Material	Clase perfil	Espesores mínimos de pared para el D del círculo de perfil						
		<25	<50	<75	<100	<200	<300	<400
Al99-99,9 AlMgSi0,5 AlMn1 AlMg1	macizo, semihueco	0,8	1	1,2	1,5	2,5	3	4
	hueco con mismo espesor	0,8	1	1,2	1,5	2,5	3	4
	hueco con distinto espesor	1	1	1,5	2	2,5	4	5
AlMgSi1	macizo, semihueco	1	1,2	1,2	1,5	2,5	4	5
	hueco con mismo espesor	1	1,2	1,5	2	2,5	4	5
	hueco con distinto espesor	2	1,5	2	2	4	5	6

Puede haber secciones asimétricas y los perfiles pueden ser: abiertos o semiabiertos, huecos o con la sección transversal hueca y con grandes diferencias entre la altura y la anchura total. Los materiales extrusionados de aluminio se fabrican a partir de tochos de aluminio, que se calientan antes de su utilización a una determinada temperatura a la cual la resistencia a la conformación sea la mínima posible, teniendo en cuenta que deben evitarse las desventajas metalúrgicas que puedan surgir por utilizar temperaturas demasiado altas. La extrusión puede ser directa o indirecta, eso depende de la matriz de la máquina que se usa para este fin. (1)

Estirados

Con excepción de los alambres que se obtienen a partir del alambre laminado, los productos extrusionados son siempre las formas de partida para los productos estirados. Con la denominación de estirado se entiende una conformación en frío, en la cual se produce un alargamiento del material, con disminución de su sección. Se puede considerar como objeto del estirado: la consecución de una mejor exactitud de medidas que se consigue con la extrusión y aumento de la resistencia por compactación en frío. Las instalaciones para el estirado del aluminio no se diferencian, en principio, de las usadas para el estirado de otros materiales. El estirado de barras o tubos se realiza en bancos de estirado en los que se introduce la pieza, con la parte inicial preparada, a través de la hilera, se fija en la mordaza y se trefila linealmente a través de la hilera. (1)

En el caso de los alambres se usa el trefilado que se realiza con frecuencia, en máquinas de estirar completamente preparadas con diversas hileras y poleas motrices. Como material de partida para la fabricación de alambre se utiliza: alambre extrusionado, alambre laminado y alambre fundido laminado.

Moldeado

Las piezas fundidas de aluminio se pueden fabricar según los procedimientos habituales de colada. Las propiedades más importantes de la fundición son:

- Alta resistencia a la fatiga y ahorros de masa hasta un 50%.
- Elevada calidad y precisión en las medidas superficiales, por lo que se requieren pocos trabajos posteriores de limpieza y gastos de mecanizado.
- Mínimo coste en los trabajos finales de acabados.

La fundición en arena es la forma de moldeo más antigua. El molde se construye con arena y ayuda de un moldeo, lo cual exige costes relativamente bajos y se puede realizar en un plazo relativamente corto y a buen precio. (1)

La fundición en coquilla es adecuada especialmente para dimensiones y masas de piezas intermedias. El molde, de acero o fundición, requiere costes elevados. Para piezas fundidas, de forma complicada, se utilizan coquillas mixtas. El rendimiento de colada, la exactitud de medidas y la calidad superficial, son superiores a las de la fundición en arena.

La fundición inyectada es la forma de moldeo más económica para grandes series de dimensiones muy pequeñas a intermedias. La libertad en cuanto al diseño está limitada ya que, no pueden realizarse con núcleos de arena, debido a la elevada presión de colada. Las piezas obtenidas según este procedimiento se caracterizan por una gran exactitud de medidas y espesor de paredes muy pequeños a una velocidad alta. (1)

Para los cálculos económicos 1kg de fundición de aluminio equivale aproximadamente a 2 kg de fundición de hierro ya que el promedio en el ahorro en masa es aproximadamente, el 50%. Los materiales de aluminio para moldeo son sistemas de aleaciones normalizadas y no normalizadas. En la elección de la aleación conviene tener en cuenta todas las exigencias establecidas para la pieza colada, por ejemplo, las referidas al grado de dificultad, tenacidad, dureza, compactación, resistencia, superficie, capacidad de mecanizado y aspecto económico. En casos concretos se tendrán en cuenta los consejos de la fundición. En la Tabla 6 vemos las características más importantes de las aleaciones de aluminio que se usan para moldear. Las aleaciones: AlMg3, AlMgSi, AlMg3(Cu), AlMgSi son preferentemente para piezas resistentes a la corrosión, pero también admiten tratamientos superficiales, eso se ve en la (Tabla 6). (1)

Tabla 6. Características de aleaciones de aluminio para moldeo [6]

	AlMg3	AlMg3Si	AlMg3(Cu)	AlMg5
Capacidad de pulido	1	1	1	1
Capacidad de anodizado decorativo	1	2	1	1
Resistencia a la intemperie	1	1	3	1
Resistencia al agua del mar	1	1	5	1
Mecanizado	1	1	1	1
Soldabilidad	4	4	4	3
Ejemplo de aplicación	En la construcción, objetos decorativos	En la construcción, objetos decorativos	En la construcción, objetos decorativos	Arquitectura interior y exterior

Leyenda: 1- extraordinaria; 2- muy buena; 3- buena; 4- suficiente; 5- condicionada.

Semielaborados. Piezas forjadas

Dependiendo del tipo de fabricación se distinguen piezas de forja en estampado y piezas de forja sin estampado. Las condiciones técnicas de suministro para piezas forjadas en estampado y sin ella regulan las características del material: medidas, dibujo de la pieza, calidad superficial y ensayo de la pieza forjada. (1)

Anodizado

El anodizado es un proceso de oxidación basado en la electrólisis que se desarrolla en el material de aluminio. El aluminio se sumerge en un baño de ácido sulfúrico por el que pasa una corriente de aproximadamente 6.000 amperios. La capa producida forma parte integrante del aluminio, no siendo una capa aplicada. Esta capa endurece la superficie, la hace más resistente a la abrasión y mejora la resistencia del metal a la corrosión y le provee de un aspecto decorativo mediante una amplia gama de colores, al permitir la capa porosa la fijación del pigmento por tratamiento electrolítico. El proceso de anodizado ha sido usado en edificación durante más de 60 años y ofrece un amplio rango de aplicaciones, además de que requiere poco mantenimiento. (17)

1.3. Propiedades del aluminio

Densidad

El aluminio es el metal más ligero de todos, con una pureza de 99,99% y densidad determinada de 2,7 g/ m³ a 20 °C. La densidad aumenta ligeramente cuando baja la pureza del metal. Le hace competencia al titanio y la fibra de carbono, que tienen características similares. A continuación en la Tabla 7 se comparan el aluminio y el acero, que es uno de los materiales más usados en la construcción. En la (Tabla 7) se ven los índices más importantes del aluminio. (3)

Tabla 7. Comparación entre aluminio y acero [7]

	Densidad a 20 °C (g/ m ³)	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)	Rigidez (GPa)	Módulo elástico (GPa)	Conductividad térmica (W/mK)
Aluminio	2,7	660	2056	26,2	71,0	205
Acero fundición	7,9	1535	2740	79,3	207	50.2

Ductilidad

Es un metal dúctil y maleable como se puede apreciar en la producción de láminas finas, mucho más fácil de conformar que el acero. Se puede extruir con relativa facilidad, por lo que es un material idóneo para la fabricación de perfiles de sección compleja, huecos o abiertos y de pequeñas dimensiones. Por eso vemos el aluminio presente en la realización de muros cortina y carpinterías para acristalamientos exteriores como interiores. (4)

Resistencia a Corrosión

La corrosión es la reacción de un material metálico con su entorno, la cual provoca una modificación medible del material y puede modificar notablemente la función de una parte metálica o de todo un sistema. El aluminio puro es un metal no corrosible, es decir cuanto menor sean los elementos de aleación utilizados en los procesos de fabricación habituales mejor. Para aparatos y recipientes de la industria química y de la alimentación como para las baterías de cocina domésticas, se emplea el aluminio puro con 99,5% de Al; en caso de necesidades altamente especiales se puede llegar a emplear un aluminio purísimo con 99,98% de Al. (18)

La resistencia a la corrosión del aluminio es condicionada tanto por la clase y concentración de las aleaciones como de las distribución de estas aleaciones. Además, la influencia de los elementos acompañantes depende del medio corrosivo, también debemos saber que con frecuencia los elementos de aleación pueden influir recíprocamente en cuanto a su acción. Como solución a la resistencia a la corrosión en caso de las aleaciones son los tratamientos térmicos o mecánicos que ejercen una influencia considerable. (18)

Como argumento de que el aluminio es un material no corrosible es el revestimiento de la cúpula de San Gioacchino en Roma proyectado por Rafaele Ingami en 1897 (Fig. 4). Esta cúpula tiene más de 100 años y sigue en buen estado gracias al aluminio que no necesita un especial mantenimiento.



Fig. 4 Cúpula San Gioacchino en Roma [13]

Resistencia mecánica

En la (Fig. 5) se puede apreciar en un diagrama tensión–deformación la resistencia del aluminio en comparación con distintos tipos de acero, fundición y madera. Vemos que su límite elástico es menor que el del acero al carbono y que es menos tenaz evidentemente que éste. (4)

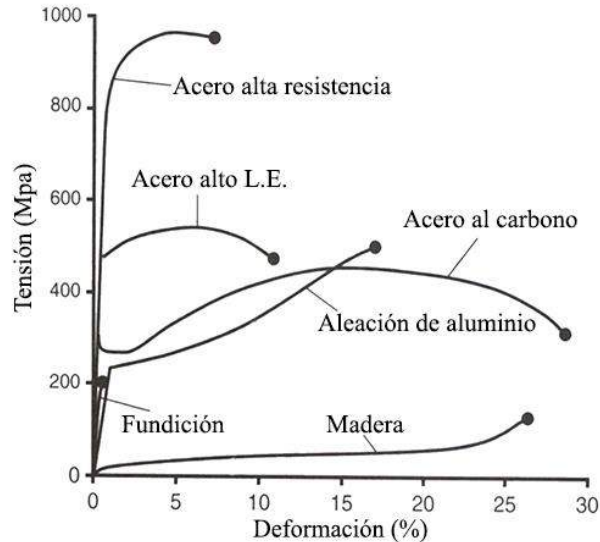


Fig. 5 Diagrama tensión – deformación [14]

En estado puro el aluminio tiene una resistencia mecánica baja, pero mejora eminentemente aleándolo con el cobre, silicio y magnesio, ó sometiéndolo a tratamientos de tipo físico como el recodico, templado y el estirado en frío. Es de mencionar que la serie 6000 es la que más se usa en arquitectura, para envolventes y estructuras. Aunque es menos resistentes que el resto de aleaciones, a cambio tiene buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión véase (Tabla 8).

Tabla 8. Comportamiento de aluminio y sus varios tratamientos [8]

Aleaciones y tratamientos	Limite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Ductilidad (%)
Aluminio puro			
Recocido	30	70	43
Tratamiento endurecido	125	130	6
Aleaciones fundidas			
Fundición	80 -140	150 – 240	2 - 1
Tratado térmico	180 -240	220 – 280	2 -< 1
Aleaciones forjadas			
Serie 2000, aleación con Cu, tratamiento térmico	270 – 425	350 – 485	18 - 11
Serie 3000, aleación con Mn, endurecimiento por deformación	90 – 270	140 – 275	11 – 4
Serie 5000, aleación con Mg, endurecimiento por deformación	145 – 370	140 – 420	15 – 5
Serie 6000, aleación con Mg + Si, tratamiento térmico	100 - 310	150 – 350	25 – 11
Serie 7000, aleación con Zn, tratamiento térmico	315 - 505	525 - 570	14 - 10

Comportamiento a fatiga a temperatura elevada

Al aumentar la temperatura, disminuyen la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza, aumenta el alargamiento de rotura y la estricción de rotura. Este comportamiento viene determinado por la composición y el estado del material. Para la determinación de los valores de resistencia a altas temperaturas y dimensionado de la estructura, el factor tiempo juega un papel esencial en contraste con las condiciones a temperatura ambiente.

(1)

Ello se puede apreciar en las (Fig.5) y (Fig.6) en el ensayo de fatiga en que la resistencia disminuye notablemente al cabo de 5 horas a 250°C para un aluminio de 99,5% de pureza y para la aleación AlMgMn respectivamente, aunque la resistencia de este último es mayor. (1)

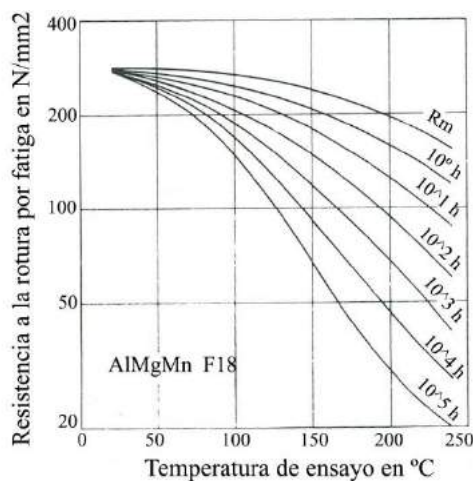


Fig. 6 Barra extruñada D=25 mm de AlMgMn [15]

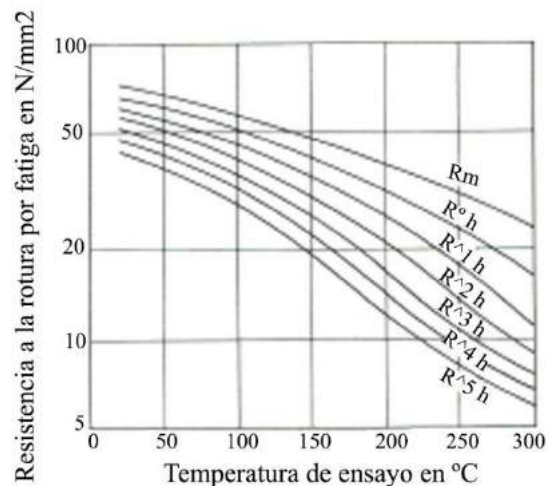


Fig. 7 Comportamiento de Al 99,5 [16]

El comportamiento de los materiales por encima de 100°C - 150°C soporta solicitaciones estáticas durante largo tiempo y solo pueden describirse con ensayos a temperaturas elevadas. El estado de solidificación y de endurecimiento, influye de diversas maneras en el comportamiento a elevada temperatura. Cuando se trata de no endurecibles su comportamiento se aproxima rápidamente al del estado blando. En caso de los endurecibles a largo tiempo se usan los que se encuentran por debajo de endurecimiento térmico. Cuando los tiempos son más cortos su utilización puede ser totalmente acertada. A continuación, tenemos unos diagramas del comportamiento de distintas aleaciones de aluminio a temperatura elevada, para poder ver las diferencias entre ellas. (1)

Comportamiento de la resistencia a bajas temperaturas

El comportamiento de los metales a bajas temperaturas depende, fundamentalmente, de la estructura de su red cristalina. El aluminio con su red cúbica centrada en las caras tiene la misma estructura que el cobre y los aceros. (1)

Al descender la temperatura, aumenta la resistencia a la tracción, primero débilmente y, a partir de -100° C cada vez con más intensidad, es decir, el aluminio es un material criogénico. También el alargamiento a la rotura aumenta al descender la temperatura. Y el porcentaje de la estricción o reducción del área de una barra en el alargamiento,

aumenta a partir de 20°C hasta -100°C, pero disminuye a -200°C en un % similar a la temperatura de partida. (1)

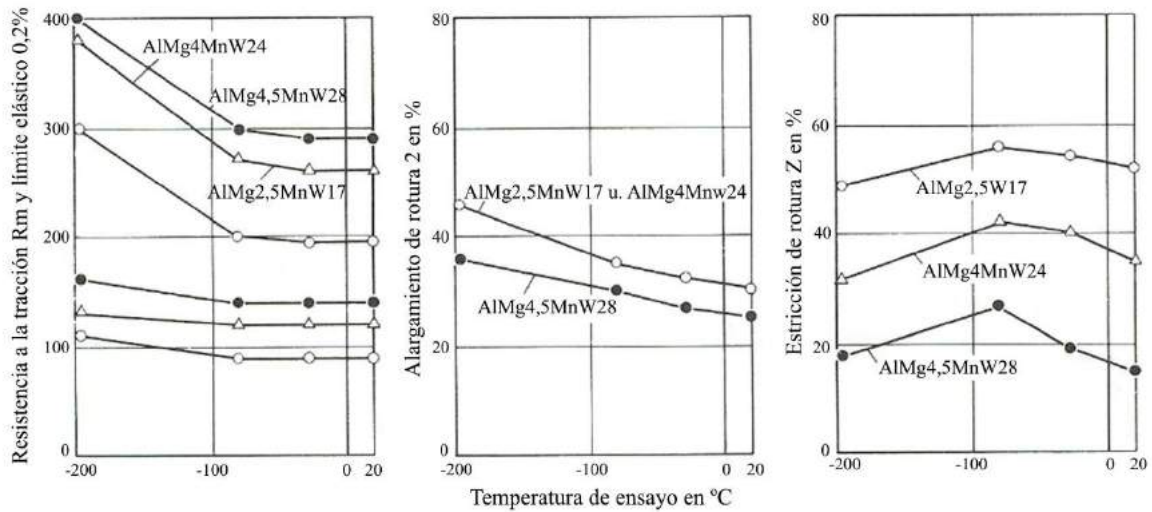


Fig. 8 Estado a bajas temperaturas de las aleaciones AlMg y AlMgMn [17]

Índice de reflexión

La superficie de aluminio de brillo metálico posee un alto poder reflector para la luz, el calor y en general para la radiación electromagnética, en un amplio margen de longitudes de onda. El alto índice de reflexión de la energía solar hace del aluminio un material idóneo para la fabricación de aislantes termorreflectantes en fachadas. (4)

Uniones

Un aspecto importante son los métodos de unión de piezas de aluminio. En la (Tabla 9) las soldaduras pueden ser con soplete o con arco eléctrico pero con limitaciones en la temperatura a trabajar, teniendo en cuenta que en la soldadura menos fuerte hay que soldar a menos de 450°C, limitación que no tiene el acero inoxidable por ejemplo con el que compete el aluminio. (6)

Tabla 9. Métodos de unión [9]

Material	Soplete	Arco eléctrico	Soldadura menos fuerte	Soldadura más fuerte	Plegado	Adhesivos
Fundición FeC	L	—	—	—	—	—
Acero	A	A	A	A	A	—
Aluminio	A	A	L	—	A	A
Plomo	—	—	A	L	A	A
Zinc	A	—	—	A	A	A
Cobre	A	L	A	A	A	A
Latón	A	A	A	A	—	—

Leyenda: (A) apropiado; (L) factibilidad limitada; (—) no factible

Parte II

Aplicación de aluminio en la estructura y envolvente

2.1. Pabellón centenario de aluminio de Jean Prouvé en París, 1954



Fig. 9 Vista Pabellón al lado de Sena [18]



Fig. 10 Vista del Pabellón al día de hoy [19]

En 1953 la fábrica Aluminium Français le encargó al arquitecto Jean Prouvé la planificación de un pabellón en París, para la exposición del Centenario de Aluminio del 12 de junio al 31 de julio de 1954, en el muelle Gros-Caillou, a celebrarse en la orilla izquierda del río Sena. Se trata de uno de los pocos edificios que Prouvé diseñó y construyó sin colaborar con algún otro arquitecto, por lo que marcó un momento culminante en su obra y paso en la historia como uno de los pabellones temporales más importantes del siglo XX. Una vez finalizada la exposición del centenario de aluminio, el edificio se volvió a usar en el verano de 1955 para la Exposición Internacional de l'Industrie Minérale. Posteriormente el pabellón abrió sus puertas a finales de 1956 para la exposición del Confort en el Hogar y del niño (Fig. 9). (19)

Así comienza la carrera del pabellón como sala de exposiciones durante 37 años, tiempo en el cual se han ido perdiendo varias partes y piezas del pabellón. En 1993 el edificio fue clasificado como monumento histórico. Se estudiaron varios emplazamientos, pero solo en 1998, gracias a la Association des Amis de Jean Prouvé, el pabellón encuentra un comprador en la empresa SIPAC, que se encargó de su reconstrucción. Se pudo restaurar solamente parte del edificio original, una sección de 90 m de largo, y se mantiene periódicamente hasta el día de hoy, de manera que puede ser visitado y admirado por el público (Fig. 10). (19)

El pabellón estaba formado por una sucesión de espacios (Fig. 11). Primero era un amplio vestíbulo de 84 metros de largo, donde se mostraban las técnicas más recientes y procesos de fabricación que transformaban al aluminio y sus aleaciones en productos terminados. Al final del recorrido había una sala de proyección que difundía de forma ininterrumpida documentales sobre la industria del aluminio. Por último, un restaurante y un bar desarrollados a partir de un modelo de construcción escolar de Prouvé, invitaban al público a descansar en un contexto único al borde del Sena. El edificio en sí, era una magnífica demostración del uso del aluminio en la construcción. “Este edificio tenía que ser un ejemplo del estado actual de la tecnología y una expresión de sus principios: 1) el uso y la conformada de chapa; 2) secciones extruidas; 3) diversidad en los elementos de unión.”² (7)

Los límites del emplazamiento en el muelle determinaron la forma general del edificio y en ciertos aspectos su principio constructivo. Estamos hablando de una plataforma de

² Peter Suizer. Jean Prouvé Oeuvre Complète/ Complete Works. Volumen3: 1994-1954. Berlín. Birkhäuser – publishers 2005. Pág. 339.

26m de ancho, que por la parte del río Sena, los servicio de navegación obligaban un paso de 7 m de ancho y por el lado contrario del río se pedía un paso de 3m por lo que se podría proyectar el pabellón en los 16 m de ancho libre. Finalmente el pabellón medía 150 m de largo por 15 m de ancho y consistía de 113 pórticos que se sucedían cada 1,34 m, lo que permitía fraccionar el espacio interior en módulos de 4 m, longitud que medía un stand común (Fig. 12).



Fig. 11 Montaje de la estructura [20]



Fig. 12 Croquis del pabellón [21]

Las vigas estaban formadas por perfiles de chapa de 4 mm de espesor y una longitud total de 16,45 m. Además de su función estructural tenían otro cometido, gracias a su forma en V servían de canalón por el cual se transportaba el agua de la lluvia (Fig. 17). Las piezas que daban forma a la cubierta y se situaban entre las vigas, eran láminas de chapa de 5 m de largo ligeramente curvadas y atornilladas a las vigas (Figs. 13y 14). (7)



Fig. 13 Montaje de la cubierta [22]

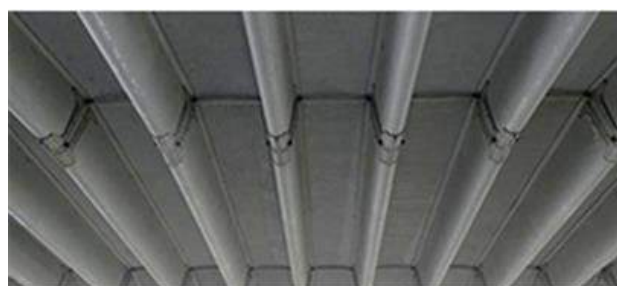


Fig. 14 Canalón de cubierta. Vista interior [23]

Los pilares se trataban de elementos tubulares compuestos por dos piezas soldadas con forma de U de sección variable, que además de su función portante evitan que el agua se acerque a la junta, protegiéndola (Figs. 15 y 16). Estas dobles funciones las encontramos también en el dintel de la puerta de acceso que actúan como dintel y como canalón, gracias a su forma de U. La función principal de estos elementos es la estructural, pero de paso su diseño les permite realizar otras como la evacuación del agua o la protección de la unión.

Aparece aquí de nuevo el principio utilizado por Prouvé de integración de varias funciones en un mismo elemento. Entre estos soportes verticales se colocaban los paneles intercambiables de vidrio o chapa metálica mediante clips a modo de resorte. En este edificio todo eran ventajas, tanto el material como la sencilla fabricación, el fácil ensamblaje, su movilidad y el hecho de que prácticamente no necesitaba mantenimiento. El peso total del edificio era de 60 toneladas y el tiempo de construcción de 21 días. El ensamblaje de piezas era totalmente mecánico y su transporte era sencillo. (7)

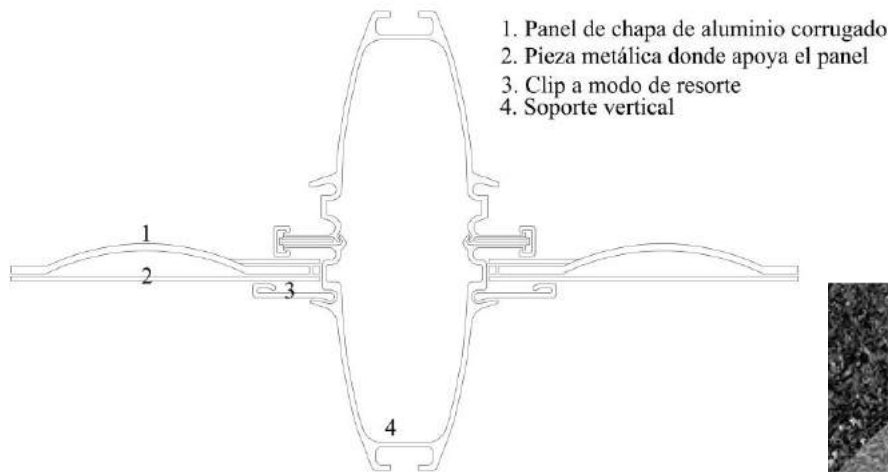


Fig. 15 Junta vertical de los paneles con el montante [24]



Fig. 16 Montante embebido [25]

Para la junta vertical los soportes principales presentan una pequeña hendidura cubierta con material plástico en la que se introduce el panel sin ningún tipo de sujeción (Figs. 17) y 18). La junta horizontal, por otro lado, se realiza mediante una pieza especial que es la que sostiene un saliente hacia el exterior para darle estabilidad. De dimensiones 46 mm de ancho por 1,25 m de largo, se coloca entre los pilares de fachada alojando en sus hendiduras al panel superior por un lado, e inferior por otro. (7)

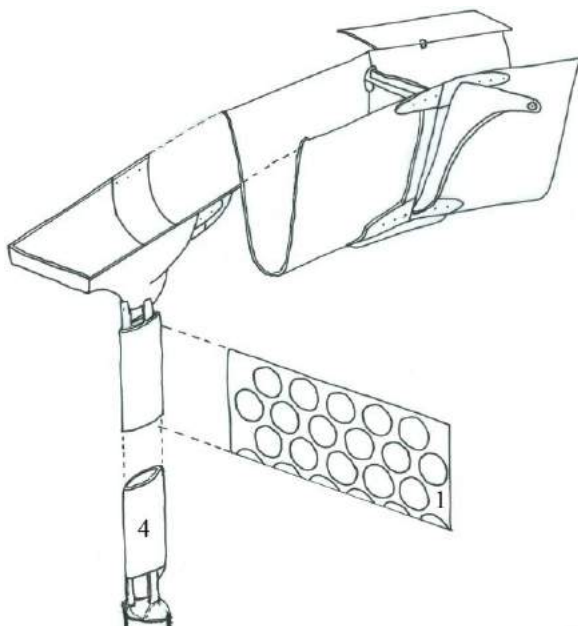


Fig. 17 Unión montante – viga en “V” y panel [26]

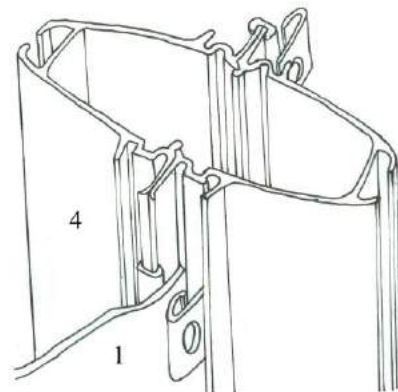


Fig. 18 Unión del montante y panel [27]

La pieza clave para la sujeción del conjunto es una pletina en forma de C que se coloca haciendo presión a modo de clip. Es rectangular de 100x80 mm con una abertura circular en el centro. Dos piezas como estas se sitúan a cada lado presionando la pieza especial que sujeta los paneles contra los soportes verticales estabilizando la unión. Este tipo de encuentro permitía por un lado la sujeción de los paneles una vez colocados, y al mismo tiempo facilitaba el intercambio de un panel por otro en el caso de que fuera necesario, o el montaje y el desmontaje del mismo. (7)

Fachadas

El aluminio es el material que se emplea tanto en la estructura como en el cerramiento. Las cuatro caras del pabellón son exteriores. La fachada principal es la que mira hacia el Sena y está orientada al norte, con una altura de 7,60 m, en cambio el alzado contrario tenía una altura de 4,60 m. En ella se alternan elementos de vidrio con paneles de aluminio, y cada cierta longitud se colocan puertas abatibles. Las fachadas laterales hacia el este y oeste son simétricas y guardan las mismas particularidades, formadas por un muro cortina de vidrio con unas puertas de salida y entrada opacas que tienen unas pequeñas aberturas circulares características de Jean Prouvé. En la fachada sur limitada por el muro de contención del muelle se colocaron los tirantes de refuerzo estructural liberando al máximo el espacio interior del pabellón (Figs. 19 y 20). (7)

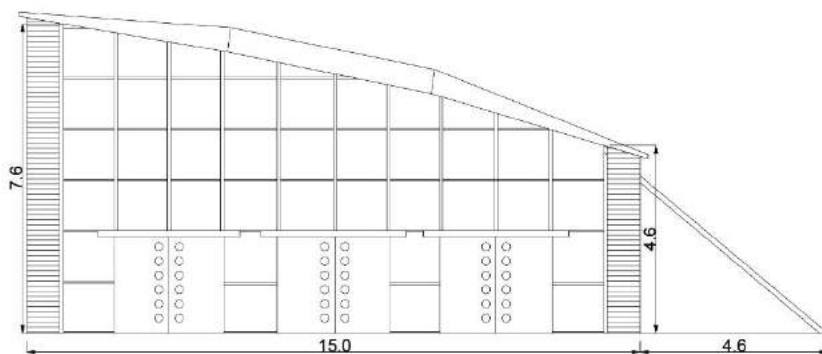
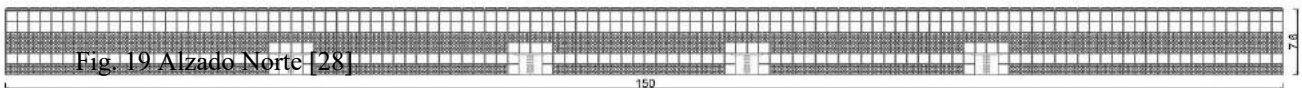


Fig. 20 Alzado Oeste [29]

Tenemos unas fachadas moduladas en horizontal cada 1,34m siendo ésta la distancia entre eje de pilar y pilar. En cambio en la vertical, la modulación es cada 1,24m, lo que dio lugar a que la puerta de doble hoja mida dos módulos en altura y dos en anchura, quedando perfectamente integrada en la fachada en cuestión (Figs. 21 y 22). Tanto los elementos de vidrio como los paneles de aluminio del cerramiento guardan las mismas dimensiones. En la fachada norte se han empleado 6 módulos en altura, mientras que en la fachada sur solo 3,5 módulos, lo que hace que la fachada norte mida 7,6m y la sur 4,6m. (7)

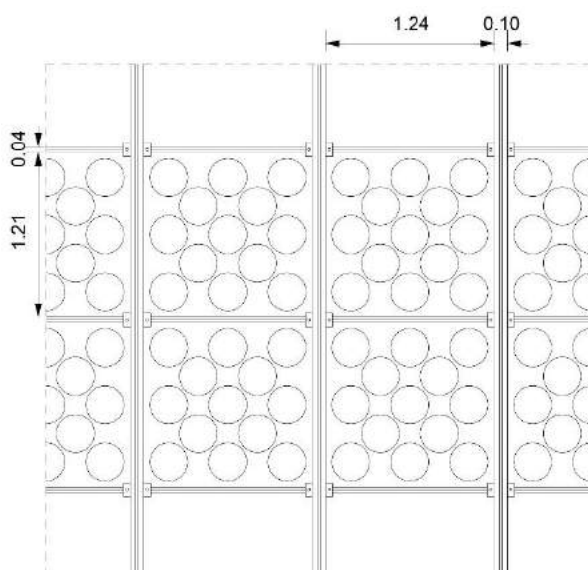


Fig. 21 Alzado de paneles de aluminio [30]

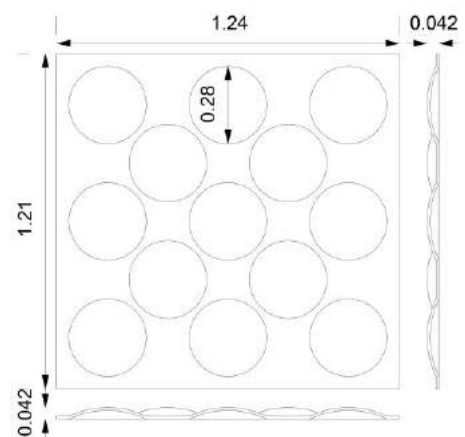


Fig. 22 Panel de aluminio [31]

En el edificio original se alternaron los paneles de aluminio con los de vidrio, de modo que en el alzado norte tenemos de abajo a arriba una fila de panel de aluminio, una de vidrio, dos de aluminio y dos de vidrio. De esta manera, entra en juego la escala: en la zona inferior no interesa la transparencia del cerramiento, por lo que el panel es opaco, mientras que a la altura de los ojos, la fachada se vuelve transparente para permitir la vista hacia el exterior. Así, la composición permite que el edificio dialogue con el paisaje, pero si interesaba atraer la atención en otras zonas, estos paneles podrían ser colocados de otra manera. (7)

El pabellón era un edificio temporal, por lo que la unión entre estructura y cerramiento se proyectó mediante un sistema de clips que facilitaba el montaje. Los paneles de aluminio están hechos de una chapa de aluminio corrugado, la sección no es regular a lo largo del panel, sino que presenta trece hendiduras distribuidas en cinco filas y cinco columnas, con forma circular de 28 cm de diámetro hacia el interior, que son las que le dan mayor rigidez. El panel está formado de una única chapa de aluminio sin ningún material aislante. (7)

2.2 Comedores para invitados y obreros de la Fábrica de automóviles Seat de Ortiz – Echagüe, Barbero Rebolledo y Joya Castro en Barcelona, 1956



Fig. 23 Comedores de SEAT [32]



Fig. 24 Croquis de los comedores de Seat [33]

Los comedores de Seat fueron proyectados por los arquitectos: César Ortiz-Echague, Manuel Barbero Rebolledo y Rafael de la Joya Castro y construido entre 1953 y 1956. Este proyecto fue objeto de reconocimiento y recibió el Premio R. S. Reynolds Memorial 1957, frente a 19 países que se presentaron al concurso. El premio debía concederse al proyecto en el cual el aluminio hubiese sido empleado tanto en los elementos estructurales como en los de cerramiento y acabado, así que fue elegido “*el primer edificio construido en España con estructura y cubierta de aluminio*”. Según las reglas del concurso el proyecto debía solucionar satisfactoriamente, el problema presentado al arquitecto, y después debía demostrar una imaginación creadora en el uso del aluminio, bajo el punto de vista estructural y estético, que promoviera un futuro desarrollo en la aplicación de dicho material en la construcción. (8) y (20)

El edificio está emplazado en un espacio reducido de terreno, previamente nivelado, donde se piensa en una construcción ligera para reducir los costes, ya que la calidad del mismo es muy mala. El proyecto consiste en 3 comedores de una sola planta, que dan servicio a 2.000 empleados de la fábrica y a todos los visitantes que reciben los talleres. El propietario estipuló que el tiempo de las comidas debe servir para el descanso, tanto físico como espiritual de los obreros, que durante horas hacen un trabajo monótono de la producción en serie. Para cumplir este propósito, los comedores forman 3 patios ajardinados con césped entre ellos lo que da un buen ambiente para comer y descansar. A dos de estos patios se abren dos pabellones destinados a comedores de obreros, de una capacidad de 500 plazas cada uno y al tercer patio se abre el pabellón destinado a empleados e ingenieros. (8), (9) y (20)

Se piensa en una construcción con estructura metálica muy ligera, sin ocultar su forma propia más que lo estrictamente indispensable, esto se puede ver en las (Figs 25 y 26). Dadas las condiciones, el aluminio reunía las características de ligereza, economía y buen aspecto al exterior. Los arquitectos decidieron usar principalmente los siguientes materiales: aluminio en la estructura principal y la cubierta; cristal en las fachadas cuya orientación lo permitiese, y el simple ladrillo en los restantes. Los frentes abiertos al jardín llevarán amplios ventanales de aluminio practicables a nivel del terreno. Los pavimentos de los comedores son de terrazo oscuro. (9)

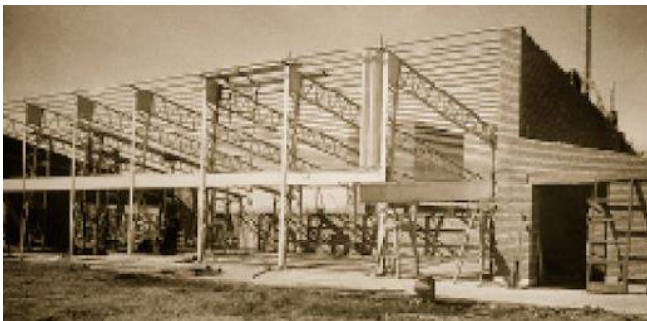


Fig. 25 Proceso de la construcción [34]



Fig. 26 Vista interior [35]

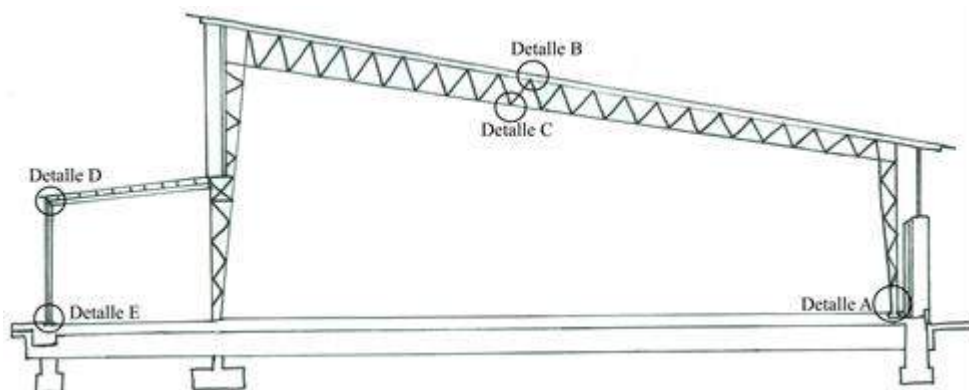


Fig. 27 Croquis sección constructiva [36]

La estructura principal está formada por pórticos de 12,80 m de luz, con 3,20 m de separación entre los mismos en celosía que quedan totalmente a la vista y cuyo peso es únicamente de 143 kg, véase la (Fig. 27). El peso de la estructura completa: pórticos, estabilizadores, correas y cubierta es de 10,3kg/m². Para luces inferiores a 5 m se han construido vigas perforadas. A continuación en la (Fig. 28) tenemos unos detalles constructivos. (8) y (9)

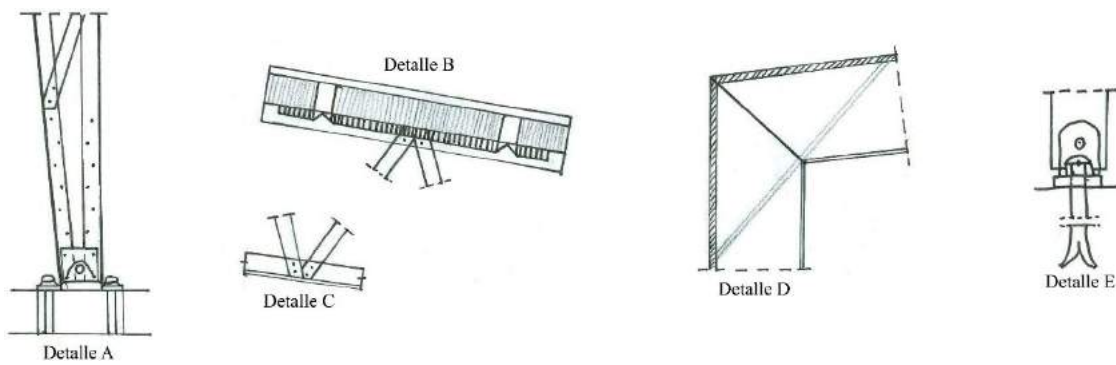


Fig. 28 Detalles constructivos [37]

La cubierta esta formada con bandas de chapa ondulada de aluminio, remachadas entre sí, con solape transversal de dos ondas atornilladas a las correas del mismo material. Bajo la cubierta se ha colocado fieltro de lana de vidrio, sobre placas perforadas de escayola, formando un cielo raso absorbente del sonido y aislante térmico. El fuerte poder de reflexión de los rayos solares, del aluminio, favorece este último punto. Para la protección contra los rayos del sol, de gran intensidad en esta zona, se ha dispuesto quebrasoles de aluminio, verticales en la orientación sureste y horizontales en el sur. Estos brisoleil se mueven simultáneamente en cada fachada accionados por un motor. Los materiales han sido tratados con toda austeridad, sin ningún revestimiento ni enlucido, con el propósito de poner de manifiesto su valor estético. (8) y (9)

El edificio fue terminado en julio de 1956. El comportamiento de la estructura de aluminio ha sido excelente, a pesar del clima marítimo no aparece zona alguna de corrosión. Bien es cierto que los elementos fueron anodizados previamente para mayor seguridad. También las dilataciones han quedado perfectamente resueltas y la estructura no ha producido grietas en la parte de fábrica. El mismo comportamiento positivo lo tenemos en el aluminio de la cubierta, a pesar de las fuertes lluvias se encuentra en perfecto estado a día de hoy. El buen resultado obtenido ha sido una satisfacción para los proyectistas, por tratarse del primer edificio construido en España con estructura y cubierta de aluminio. (9)

2.3. Casa de aluminio de Toyo Ito en Tokio, 2000

Toyo Ito recibió un pequeño encargo de hacer una vivienda en Tokio y así tuvo la oportunidad de desarrollar un sistema constructivo integral en aluminio produciendo una arquitectura ligera, industrializada y de rápida ejecución, utilizando el material tanto en los elementos estructurales como en los acabados, aunque ha sido algo relativamente caro. El proyecto está hecho completamente por elementos prefabricados, una prefabricación de alta precisión, que proporciona al proceso constructivo muy ágil. (10) y (21)



Fig. 29 Casa prototipo de aluminio vista exterior [38]

La única parte fabricada in situ es el sistema de cimentación, una losa de 25 cm de espesor. La construcción se lleva a cabo como un mecanismo: se empieza por los pilares y vigas, después el suelo y el techo y a continuación las paredes, eso se puede apreciar en la (Fig. 32). Se sueldan en obra los paneles de formación de suelos y techos. Esta tecnología que solo exige soldadores cualificados permite resolver detalles constructivos muy complejos y abre caminos verdaderamente interesantes a la construcción. Este sistema de prefabricación de los elementos reduce el plazo de construcción, por lo que la casa se hizo en 3 meses. (10)

Este proyecto residencial sirvió de prototipo para desarrollar un sistema estructural compuesto íntegramente por piezas de aluminio extrusionado. El uso de elementos nervados tanto en los planos horizontales como verticales hace que la estructura funcione de forma solidaria distribuyendo las cargas en todas sus superficies. Los paramentos verticales tienen 70 mm de espesor y los forjados 100 y 150 mm, véase las (Figs. 30 y 31). Todas las piezas llegan a la obra preparadas para su montaje y las uniones se realizan mediante tornillería de acero inoxidable para evitar la corrosión. (10)

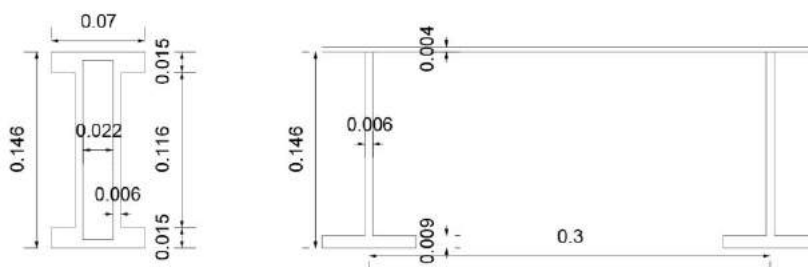


Fig. 30 Piezas estructurales de Forjado de cubierta [39]

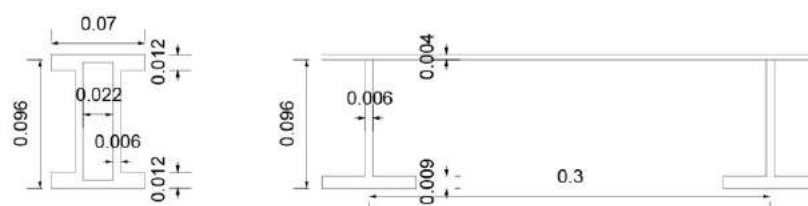


Fig. 31 Piezas estructurales de Forjado de planta alta [40]

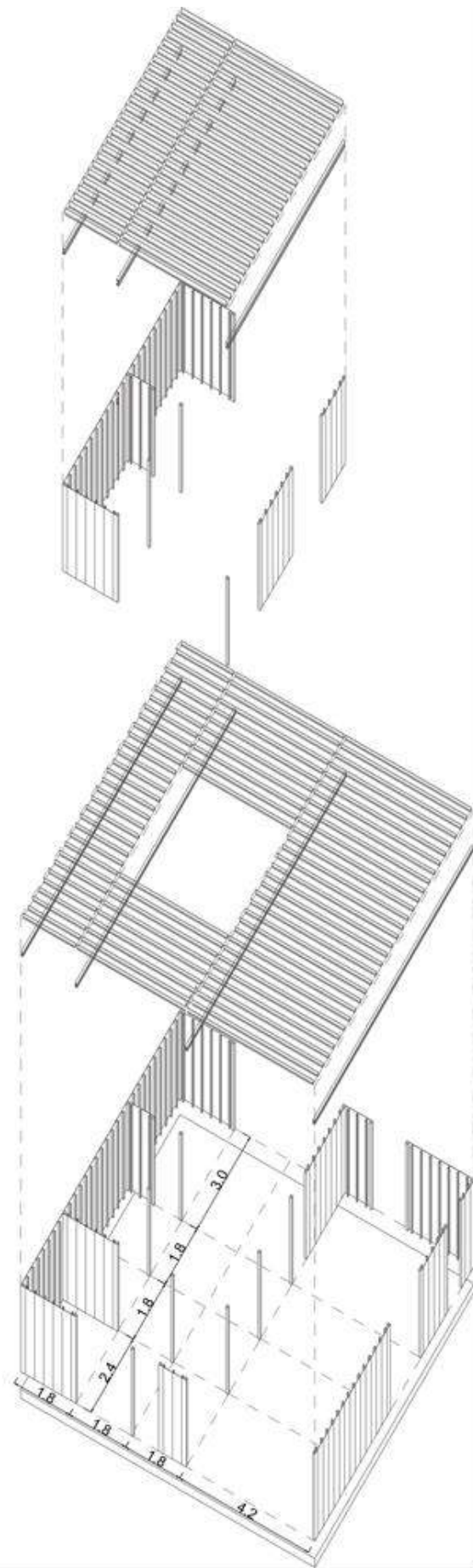
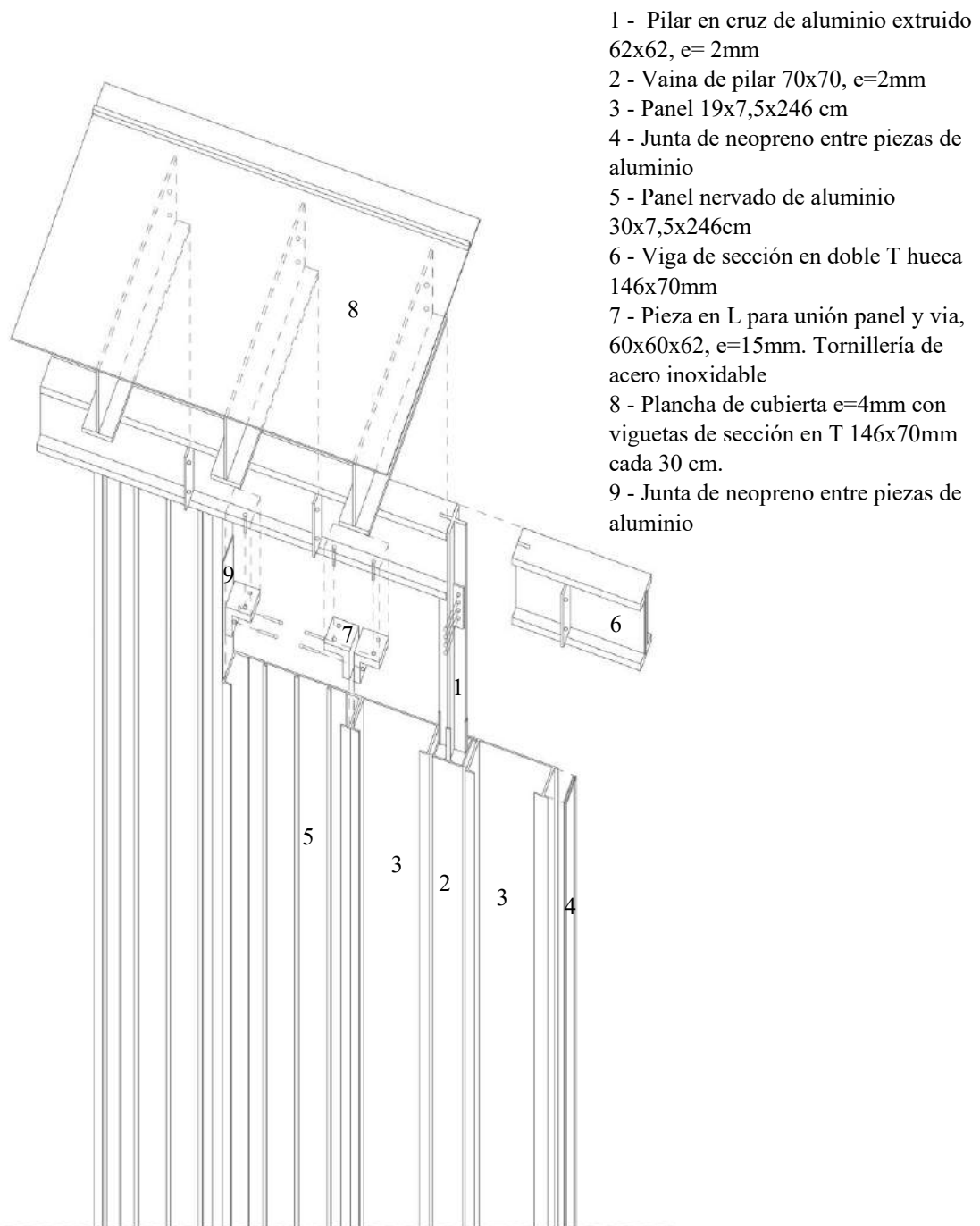


Fig. 32 Axonometría de la estructura [41]

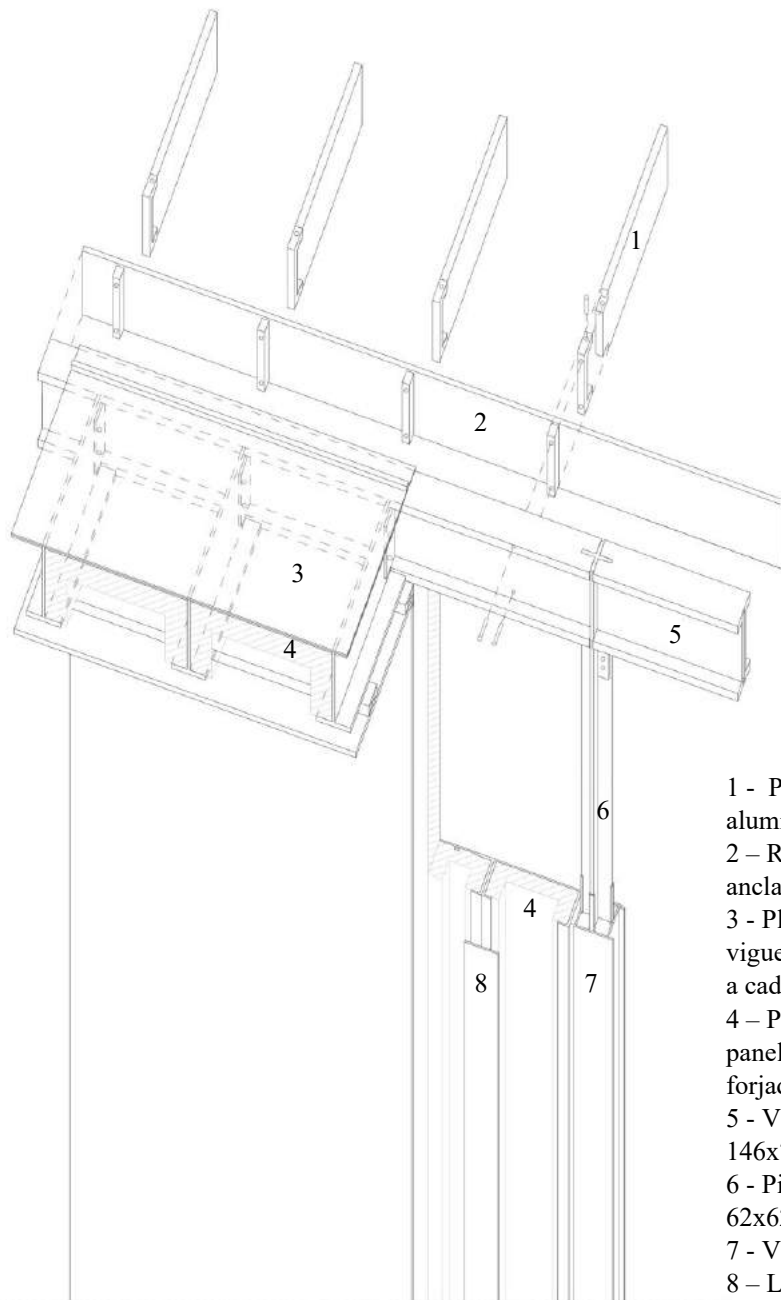
Los forjados y cubiertas se realizaron con planchas de aluminio de 4 mm de espesor nervadas con viguetas en forma de T invertida que se apoyan sobre vigas en doble T huecas. La estanquidad de la cubierta se resolvió de forma extraordinariamente sencilla basándose en las tecnologías de la industria naval y automovilística. Las chapas de aluminio de 4 mm que las forman se colocaron sin pendiente. Las juntas entre ellas se soldaron y se instaló un solo canalón en uno de los lados de cada cubierta de forma que desagua por rebosamiento. La ausencia de capa impermeabilizante exigió que la mano de obra que realizó las soldaduras fuese especialmente cualificada. (10)



- 1 - Pilar en cruz de aluminio extruido 62x62, e= 2mm
- 2 - Vaina de pilar 70x70, e=2mm
- 3 - Panel 19x7,5x246 cm
- 4 - Junta de neopreno entre piezas de aluminio
- 5 - Panel nervado de aluminio 30x7,5x246cm
- 6 - Viga de sección en doble T hueca 146x70mm
- 7 - Pieza en L para unión panel y via, 60x60x62, e=15mm. Tornillería de acero inoxidable
- 8 - Plancha de cubierta e=4mm con viguetas de sección en T 146x70mm cada 30 cm.
- 9 - Junta de neopreno entre piezas de aluminio

Fig. 33 Detalle de unión entre pilar y paneles de aluminio [42]

La losa de cimentación, tenía perfiles en U o L lineales de acero inoxidable embebidos en los ejes donde se debían insertar los elementos de aluminio. Sobre estos, se dejaron unos pernos en espera justo en los puntos en donde se instalaba cada panel de fachada.



- 1 - Pérgola formada por plancha de aluminio 150x15mm
- 2 - Remate de aluminio 125x10mm anclado a viga de borde
- 3 - Plancha de cubierta e=4mm con viguetas de sección en T 146x70mm a cada 30 cm
- 4 - Poliuretano proyectado e=3cm en paneles verticales y e=4,5cm en forjados
- 5 - Viga de sección en doble T hueca 146x70mm
- 6 - Pilar en cruz de aluminio extruido 62x62, e= 2mm
- 7 - Vaina de pilar 70x70, e=2mm
- 8 - Lámina de neopreno e=3mm

Fig. 34 Detalle de unión entre pérgola y la estructura [43]

2.4. Espuma de aluminio en la estructura

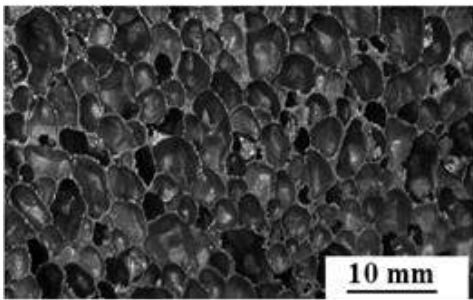


Fig. 35 Espuma de aluminio de poro cerrado [44]

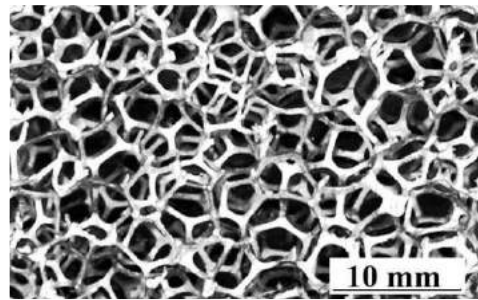


Fig. 36 Espuma de aluminio de poro abierto [45]

Se aplica en la industria aeroespacial, ferroviaria, automoción, naval y también en construcción. La espuma de aluminio es isotrópica por la distribución aleatoria de los poros dentro de la estructura. De acuerdo a los estudios realizados sobre las propiedades mecánicas de las espumas de aluminio, la mejor combinación de propiedades se encuentra en espumas con un elevado número de poros (82 % - 95 %), una densidad relativa baja (0,2-0,5 g/cm³), una buena distribución de poros (40 %-70 %) y un tamaño de poro entre 0,02 y 0,12 mm². (11)

Puede conseguirse la espumación de piezas sinterizadas en estado sólido por espumación de un gas inerte mediante tratamiento térmico. También, es posible obtener espumas de aluminio por electrodeposición o por deposición en fase vapor. En la sinterización se produce la unión de partículas muy pequeñas en otras más grandes y más compactas. (11)

Las espumas se dividen en dos tipos de estructuras: de poros cerrados, que se caracterizan por tener una gran rigidez y gran aislamiento acústico que se usa en aplicaciones estructurales (paneles, pilares), ver (Fig.35) y de poros abiertos, que habilitan aplicaciones para la disipación de calor, recuperación de elementos, y se usa mucho por sus habilidades térmicas, ver (Fig. 36). Aunque el punto de fusión del aluminio es bastante bajo, las espumas de aluminio permanecen estables al exponerse a la llama en caso de incendio debido a la estabilidad de la alúmina formada superficialmente. (12)

Entre los usos ya explorados a escala real de las espumas de aluminio, se emplean como rellenos o núcleos rigidizadores de paneles sandwich, en sustitución de estructuras de panel de abeja o de espumas poliméricas. Se han empleado como rellenos de estructuras de máquinas, con el fin de incrementar la rigidez y reducir vibraciones. (12)

Parte III

Aplicación de aluminio en la envolvente

3.1. Museo de Bellas Artes de Mansilla y Tuñón en Castellón, 2000

El Museo de Bellas Artes de Castellón para guardar los tesoros de la ciudad fue construido por Luis Moreno Mansilla y Emilio Tuñón entre los años 1995 y 2000. El edificio gira alrededor de claustro ajardinado con unos magníficos cipreses, perteneciente al antiguo Colegio de Serra Espadá. Rodeado por un entorno de edificaciones residenciales de ocho plantas, el museo ocupa la totalidad de la manzana, estructurando el programa en cuatro grandes bloques de acuerdo a la forma tradicional en este tipo de museos: público, semipúblico, trabajo y almacenamiento. Estos bloques se organizan en edificaciones claramente diferenciadas que se adosan al edificio claustral. En el edificio central se ubican las dependencias del museo a puerta cerrada y las oficinas. Adosado a éste, en el lado este se construye un edificio de nueva planta de forma cúbica, donde se localizan las diversas salas de exposición de la colección permanente. En el lado oeste y separado del edificio existente, una nueva edificación longitudinal alberga las dependencias de restauración. Y, por último, en el sótano bajo el pabellón de restauración, se localizan los depósitos de fondos, conectando las áreas de trabajo y el edificio de exposición. La construcción que alberga las salas es un apilado de plantas de iguales dimensiones, en las que un espacio a doble altura se va desplazando en cada nivel, transformándose en una cascada de vacíos que con los mismos elementos convierte a cada planta en un lugar diferente. Está revestido y protegido por una malla de placas de fundición de aluminio en las que se graba como quedaba escrito en los antiguos ladrillos romanos que conserva el museo, su destino: Museu De Belles Arts. (22)



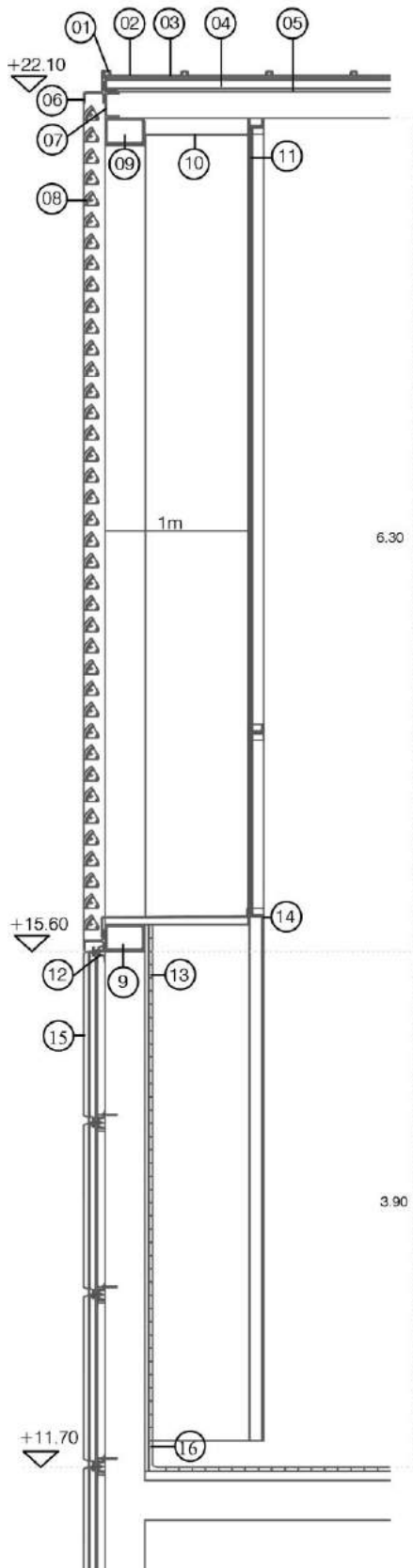
Fig. 37 Museo de Bellas Artes [46]



Fig. 38 Alzado de Museo de Bellas Artes [47]

El edificio principal se construye de acuerdo a una retícula 7,30x6,60m, con módulos de 5x4m. Los cinco niveles de edificio de salas de exposición permanente se ven surcados por una cascada de salas en doble altura que permite una visión diagonal que atraviesa todo el edificio, hasta el patio del semisótano. Un mecanismo de sección que permite una gran compacidad espacial – un rendimiento óptimo de la superficie construida. La organización del espacio desde su diversidad en dimensiones, situación y orientación, permite el paso de la luz y multiplica homogéneamente la unidad espacial. Las plantas entre sí están organizadas con el conjunto de tal forma que permite al visitante al recorrer una planta, encontrarse con una sucesión de espacios que hacen referencia a tres escalas

diferentes: la de las salas entre forjado con una altura libre de 3,30m, la de las salas de doble altura, con una altura libre de 6,90m, y la que produce la visión diagonal que recorre la totalidad del edificio. (13)



- 1 - Vierteaguas de chapa plegada de acero galvanizado de e=4mm
- 2 - Cubierta de chapa de cinc e=1,2mm con pátina gris oscuro al titanio
- 3 - Lámina impermeabilizante a base de fibra de poliéster
- 4 - Aislamiento rígido de e=8cm
- 5 - Mortero para formación de pendiente
- 6 - Bastidor para el soporte de la reja de lamas, de perfil HEB-180 de acero galvanizado
- 7 - Perfil UPN-200 de acero galvanizado
- 8 - Lama de fundición de aluminio
- 9 - Marco estructural, tubo hueco de 200x300mm de acero galvanizado
- 10 - Forro de chapa de e=4mm de acero galvanizado
- 11 - Vidrio climalit 6+6+6mm
- 12 - Anclaje de acero tipo Halfen
- 13 - Panelado de tablas de madera de roble sobre rastreles con anclaje oculto
- 14 - Ventanal de perfil HEB-120 de acero galvanizado
- 15 - Panel moldeado de aluminio
- 16 - Rodapié de fundición de aluminio

Fig. 39 Sección constructiva de muro de fachada [48]

El cerramiento exterior está formado por un muro, ventilado, de inercia invertida, con un acabado metálico a base de paneles de fundición de aluminio reciclado (Fig.40). Las placas de aluminio fundido son de gran belleza y precisión constructiva que vibran con una luz y cuya resonancia evoca los tesoros que alberga el edificio. La unidad tectónica se sitúa en una malla constructiva que reviste todo el edificio con el sistema estirado de las lamas de aluminio creando textura con el brillo y la sombra, y grabando en cada una de ellas la marca Museu de Castelló (Figs. 41, 42 y 43). Esta ingeniosa solución de fachada ha representado a los arquitectos en la Exposición de la Bienal de Arquitectura en Venecia 2000. La sección constructiva demuestra que hay una cámara de aire de un 1m entre las placas de aluminio y el vidrio, lo que sirve de aislamiento (véase Fig.39). Es importante saber que se prohíbe el galvanizado en frío y el caso en que eso no se puede evitar en alguna pieza en taller, entonces se sustituirán las soldaduras por uniones atornilladas. Todos los perfiles galvanizados se acabarán en pintura Hammelite gris plata. (23)

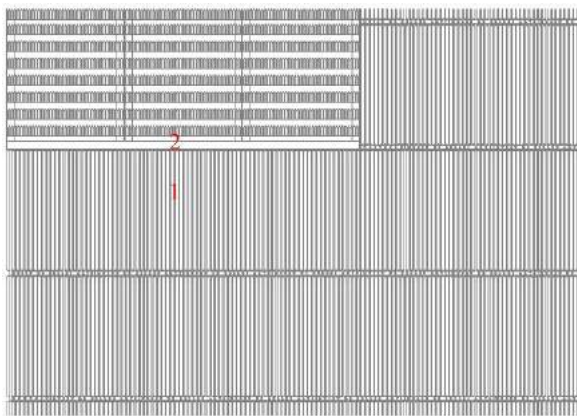


Fig. 40 Una parte de alzado [49]

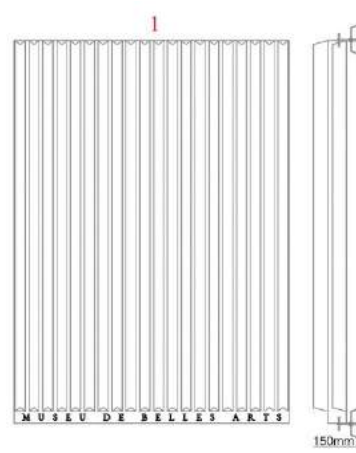


Fig. 41 Pieza de fundición de fachada [50]

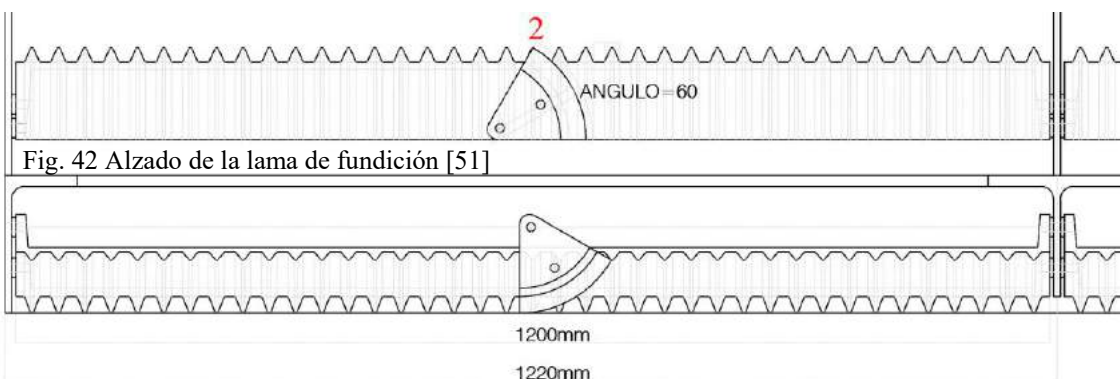


Fig. 42 Alzado de la lama de fundición [51]

Fig. 43 Sección horizontal de la lama de fundición [52]

La arquitectura de Tuñón y Mansilla representa la continuidad de la producción arquitectónica de su maestro Moneo, enlazando un nuevo eslabón de los mejores y más exportados ejemplos de la arquitectura en aluminio. (22)

3.2. Selfridges de Jan Kaplický y Amanda Leveté en Birmingham, 2003



Fig. 44 Vista exterior Selfridges de día [53]



Fig. 45 Vista exterior Selfridges de noche [54]

Jan Kaplický y Amanda Leveté dueños del estudio de arquitectura Future Systems ganaron el concurso para diseñar el centro comercial llamado Selfridges, en Birmingham, en una gran zona comercial. Recibieron el importante premio RIBA en 2004 otorgado por el Real Instituto de Arquitectos Británicos. Querían diseñar una tienda departamental de arte, que a su vez también podría convertirse en un icono arquitectónico que estaba a la altura de la prestigiosa empresa de Grandes Almacenes. El nuevo edificio híbrido contrasta fuertemente con su entorno urbano, que se diferencia de inmediato con respecto a la arquitectura tradicional existente a su alrededor y destaca enormemente tanto de día como de noche. Es uno de los mejores ejemplos de nuevos movimientos arquitectónicos surgidos a principios del siglo XXI, llamada arquitectura Blob. Hablamos del biomodernismo, cuya peculiaridad reside en que los edificios tienen una apariencia orgánica. La envolvente fue inspirada en los famosos discos del diseñador Paco Rabanne del siglo XX y en el revestimiento de fachada de la iglesia Gesu Nuovo de Nápoles en el siglo XVI, que está compuesta por un almohadillado de piedra. (24)

El edificio dispone de pequeñas aberturas enfatizadas en otro color a modo de escaparates como la propia entrada al centro comercial, un ventanal de restaurante o una puerta que conecta los grandes almacenes con el parking anexo a través de una pasarela suspendida de 37 m de longitud. De esta forma consiguen romper la sensual homogeneidad de la fachada con el revestimiento geométrico de los discos. El edificio híbrido se distribuye en torno a dos patios de luces a modo de claraboyas que inundan el interior de luz natural; numerosas escaleras mecánicas esculpidas en color blanco que embellecen estos espacios diáfanos comunican las distintas plantas. El edificio se distribuye en cuatro plantas principales de 4,5 metros de altura; una planta de carga y descarga a nivel de sótano y otra planta técnica en la cubierta completan la distribución del edificio. La estructura del Selfridges es mixta; los pilares son metálicos y los forjados están compuestos por un sistema constructivo EMI mediante vigas perpendiculares entre sí que soportan una fina losa de hormigón. (24)

La innovadora fachada tecnológica, aparte de proteger el interior del edificio de la radiación solar, consigue recoger el agua de la lluvia mediante diferentes conductos que abastecen a los propios servicios sanitarios del edificio, de tal forma que el edificio se

convirtió en una obra ecológica y sostenible. La fachada tiene una superficie brillante de placas de aluminio anodizado sobre un fondo azul. Como se ha indicado antes, el anodizado es un proceso electrolítico para incrementar la capa de protección del aluminio, una oxidación anódica superficial, mate o brillo, por inmersión de la pieza en disolución de ácido sulfúrico al 15-20%, a $T=20-22^{\circ}\text{C}$ y conexión al polo positivo (ánodo) de una corriente continua. Tiene unos espesores comprendidos entre 15 a 80 micras. Los discos se eligieron después de un largo ensayo de prueba-error teniendo en cuenta la escala del edificio. Probaron con cerámica, pero les dio la sensación de que carecía de vida, entonces estudiaron el vidrio que era más atractivo, pero técnicamente difícil y costoso. Finalmente el aluminio anodizado fue la mejor elección por su brillo y profundidad que ningún otro metal tenía. Recoge la luz que hay alrededor, la puesta del sol, el amanecer, los faros de los automóviles, la ropa de las personas, todo se conecta de una manera que crea movimiento. Los discos tiene un diámetro de 60 cm y son fácilmente desmontables en caso de posible deterioro. Se usaron aproximadamente unos 1500 discos de aluminio anodizado, que han sido anclados mediante montantes de acero al muro estructural (Fig.46) que tiene una capa de hormigón de 175 mm al exterior. (011)

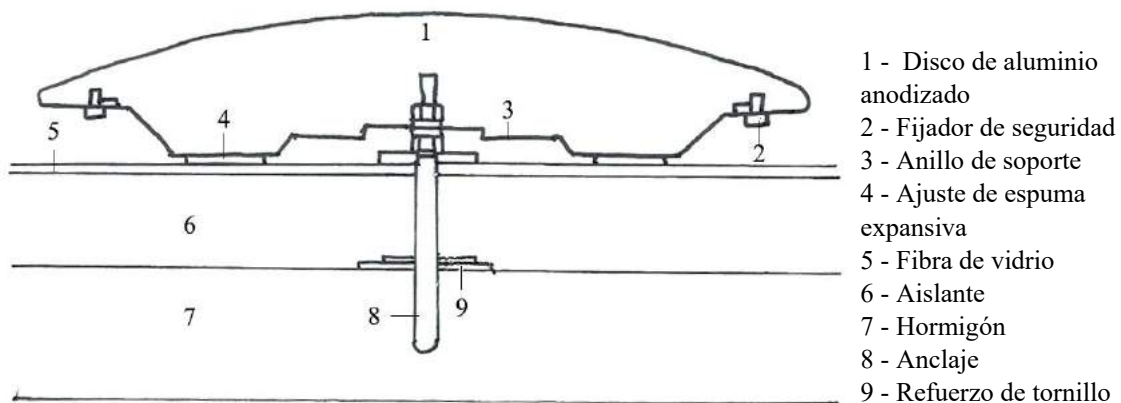


Fig. 46 Detalle anclaje del disco de aluminio al muro estructural [55]

Es importante mencionar que en Birmingham, los veranos son cortos y parcialmente nublados y los inviernos son largos, fríos, ventosos y mayormente nublados. Tiene un clima húmedo, propenso a lluvias durante todo el año, siendo el mes de octubre el de mayor cantidad de lluvia con un promedio de 57 milímetros y el mes de febrero con menor cantidad de lluvia y un promedio de 33 milímetros. Eso demuestra una vez más que el aluminio no es un material corrosivo y es resistente a un clima húmedo.

3.3. Iglesia Evangélica de Carlos y Lucía Ferrater en Terrassa, 2010



Fig. 47 Conjunto de Iglesia Evangélica y guardería [56]

La Iglesia Evangélica de Terrassa fue encargada en 2008 al gabinete Office of Architecture in Barcelona OAB a los arquitectos Carlos y Lucía Ferrater, quienes a su vez contaron con la colaboración de Emiliano Scotti para su ejecución. El edificio ocupa la tercera parte de un solar de la avenida Béjar y dispone de 2500 m² destinados a usos religiosos y sociales, porque el convenio con el ayuntamiento les obligaba a disponer de un programa de actividades sociales. (25)

El complejo se manifiesta como un gran basamento que va disminuyendo su altura a causa de la pendiente del terreno, formado por pletinas de acero a modo de revestimiento. El proyecto concebido por OAB parece fluir en torno a un gran elemento central de forma cúbica que da cabida a la sala de culto o auditorio. Pero a continuación tiene otro cuerpo más pequeño y de menor altura en el que se distribuyen las distintas dependencias del edificio, entre ellas una guardería infantil. (25)



Fig. 48 Fachada del bloque de la guardería [57]



Fig. 49 Iglesia Evangélica [58]

El edificio de la iglesia es un cubo aristado y modulado revestido con aluminio reciclado, prensado e inyectado que gracias a su brillo le otorga un carácter emblemático a la pieza que alberga en su interior, la sala de culto (Fig.49). Estos paneles de aluminio se usan tanto al interior como al exterior. Al interior sobre todo para el aislamiento acústico. En nuestro caso se usan al exterior como un aislante, y sirve también como exterior de fachada. Los paneles han sido anclados a la fachada con ayuda de unos montantes, como se ve en la Fig. 50. (25) y (26)

El edificio destinado a la guardería cuenta con un acceso propio (Fig.48) por lo que dispone de cierta autonomía. Cuenta con menos altura y se extiende en forma de voladizo suspendido de la estructura central. En este caso las aristas enmarcan unos planos de aluminio ondulado y perforado que actúan de celosía como segunda piel. Mientras la fachada a la avenida Béjar se presenta como un plano tenso, riguroso y continuo que esconde su acceso, las dos fachadas laterales muestran su cara más amable donde la vegetación enmascara una valla que actúa de segunda fachada de manera que el plano del vidrio se atrasa respecto al límite del solar y así todos los espacios perimetrales disfrutan de luz y ventilación, así como de intimidad y seguridad. (26)

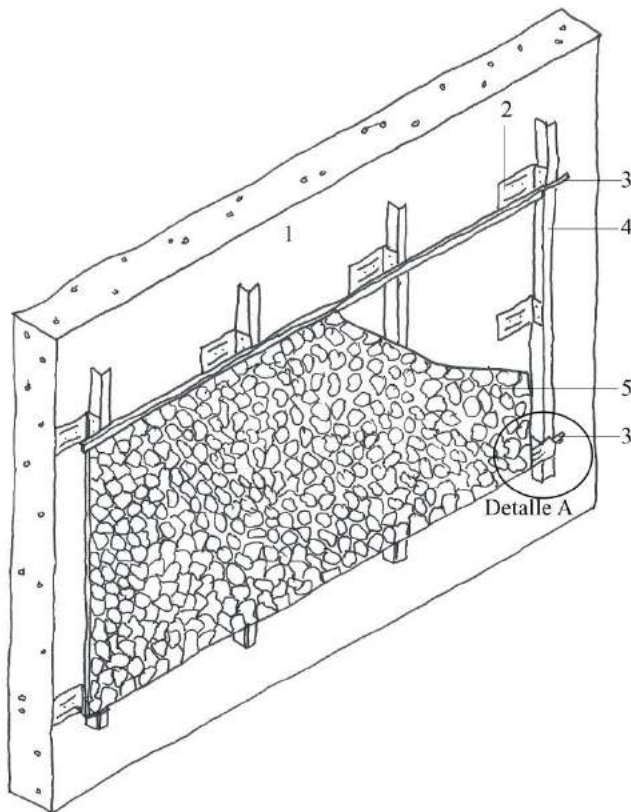


Fig. 50 Detalle de anclaje del panel de "Alusion" al muro [59]

- 1 - Muro de hormigón
- 2 - Escuadra de fijación
- 3 - Perfil J
- 4 - Perfil montante
- 5 - Placa Alusion
- 6 - Cinta de montaje
- 7 - Perfil para extremo inferior
- 8 - Cordón adhesivo

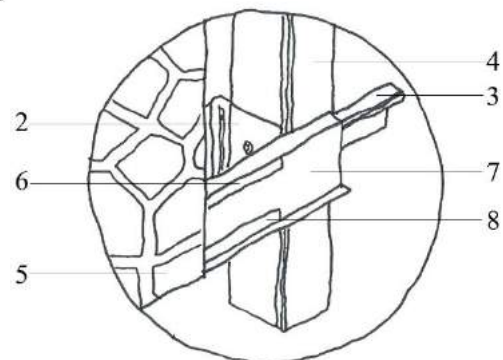


Fig. 51 Detalle A [60]

Mientras los criterios compositivos del interior responden a criterios funcionales, los exteriores responden a la situación, a la orientación y sobre todo al deseo de ser un edificio discreto y contenido desde la distancia corta pero al mismo tiempo una pieza referente del culto evangélico a una distancia más lejana. (26)

3.3. Louvre Lens de Sanaa en Lens, 2012



Fig. 52 Vista exterior de Louvre Lens [61]

El museo Louvre Lens es el resultado de un concurso que se celebró en el año 2005 y que lo ganó Sanaa en la ciudad de Lens, en la región Pas de Calais al norte de Francia, con una estructura baja que despliega una superficie de 28.000 m² sobre los terrenos restaurados de una antigua mina de carbón de la ciudad, pero se inauguró el 4 de diciembre de 2012. El solar en sí mismo es un terreno horizontal, producto de la acumulación de residuos mineros, elevado varios metros sobre el nivel de la calle, donde nuestro proyecto hace uso de este paisaje histórico como estrategia de partida del diseño. El proyecto es un conjunto de reflejos, de transparencias y sensaciones metálicas. La fachada es revestida de forma alternada con aluminio claro reflectante y vidrio que ayudan a crear un juego de reflejos que permiten la disolución del edificio en el paisaje. Su percepción se anima con las tonalidades del cielo y la vegetación, cambiando su apariencia a lo largo del día y de las estaciones. Todos los volúmenes describen una ligera curva que acompaña las líneas de fuerza del solar, creando delicados espacios interiores que guían el movimiento de los visitantes, de una sala hasta la próxima, distorsionando las líneas de visión y estableciendo una considerable interacción con las obras de arte expuestas. El acceso se ha diseñado como una pieza permeable y transparente en todas las direcciones, relacionada con la cafetería, la librería y los controles de acceso, un espacio desde el que se puede ver el nivel inferior con áreas de exposición y la biblioteca, quedando en un lateral de esta área los tres volúmenes dedicados a las 3 salas de exposiciones. (14)

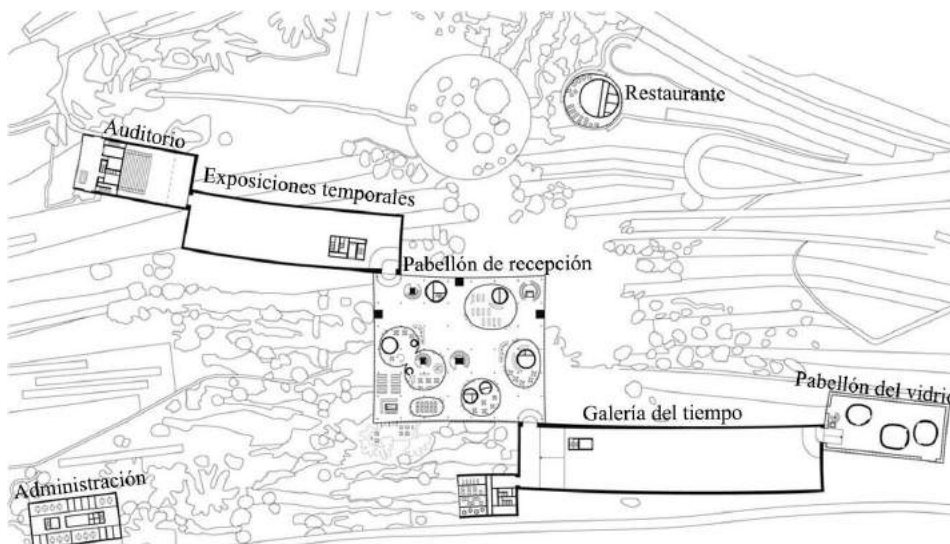


Fig. 53 Plano general del museo Louvre Lens [62]

Las cinco principales piezas que conforman el conjunto se caracterizan por la utilización de una estructura metálica y vidrio, en el que se incluye una galería de 125 metros de largo con un auditorio separado, véase Fig.53. En el interior la solución adoptada es una iluminación natural controlada con el empleo de un mecanismo de oscurecimiento en la cubierta y de una membrana interior fotosensible. El diseño elegido es un modelo de arquitectura de fácil acceso, en contacto con la tierra, sensible a su belleza y fragilidad, y abierto a la naturaleza. Los cinco edificios principales se colocan en el lugar como barcos en un río que flotan delicadamente, al que se unen otros cuatro edificios menores. Los jardines se han diseñado como parte integral del proyecto arquitectónico. Los jardines y los edificios interactúan entre sí generando un juego de reflejos y espejos en las paredes exteriores. Los motivos del jardín se combinan a lo largo de diferentes zonas para que los visitantes descubran diferentes visiones y percepciones variadas. (27)



Fig. 54 Fachada de aluminio del Louvre Lens [63]



Fig. 55 Fachada de vidrio del Louvre Lens [64]

En el caso del pabellón de los Tiempos, que es el espacio expositivo principal, vemos que el recorrido se inicia en el hall y se abre al Pabellón de Vidrio, un espacio para exposiciones temporales con fachada acristalada, que ofrece una vista ininterrumpida hacia el parque. Se trata de una exposición cronológica de obras de la colección del Louvre. Este pabellón está concebido deliberadamente diáfano de 25m de ancho y 120m de largo para facilitar la máxima flexibilidad del programa. Se crea un paisaje aislado organizado cronológicamente a lo largo de la sala y geográficamente en dirección transversal. Los muros perimetrales, sensiblemente curvados y revestidos por paneles de aluminio anodizado por ambas caras, crean una superficie continua que acentúa el reflejo de lo que ocurre alrededor con registros a modo de acuarelas. Su revestimiento interior, con paneles de aluminio, disuelve los límites de la galería y produce inflexiones de color reflejado. Se crea un espacio de intercambio que redefine la forma de percibir el tiempo, alcanzando la intensidad de una sucesión continua de momentos dentro de un permanente presente. La propia atmósfera del espacio anula la compartimentación del tiempo en pasado y futuro para impulsar una lectura del presente. La luz natural se filtra a través de la cubierta que permite ver el cielo. Los paneles exteriores están anclados a la estructura de hormigón, mediante unos montantes y están separados del muro de hormigón por una capa de aislamiento, véase (Fig. 56). Mientras que los paneles interiores se anclan de igual manera por unos montantes, pero se separan del muro estructural por una capa de aire. (28)

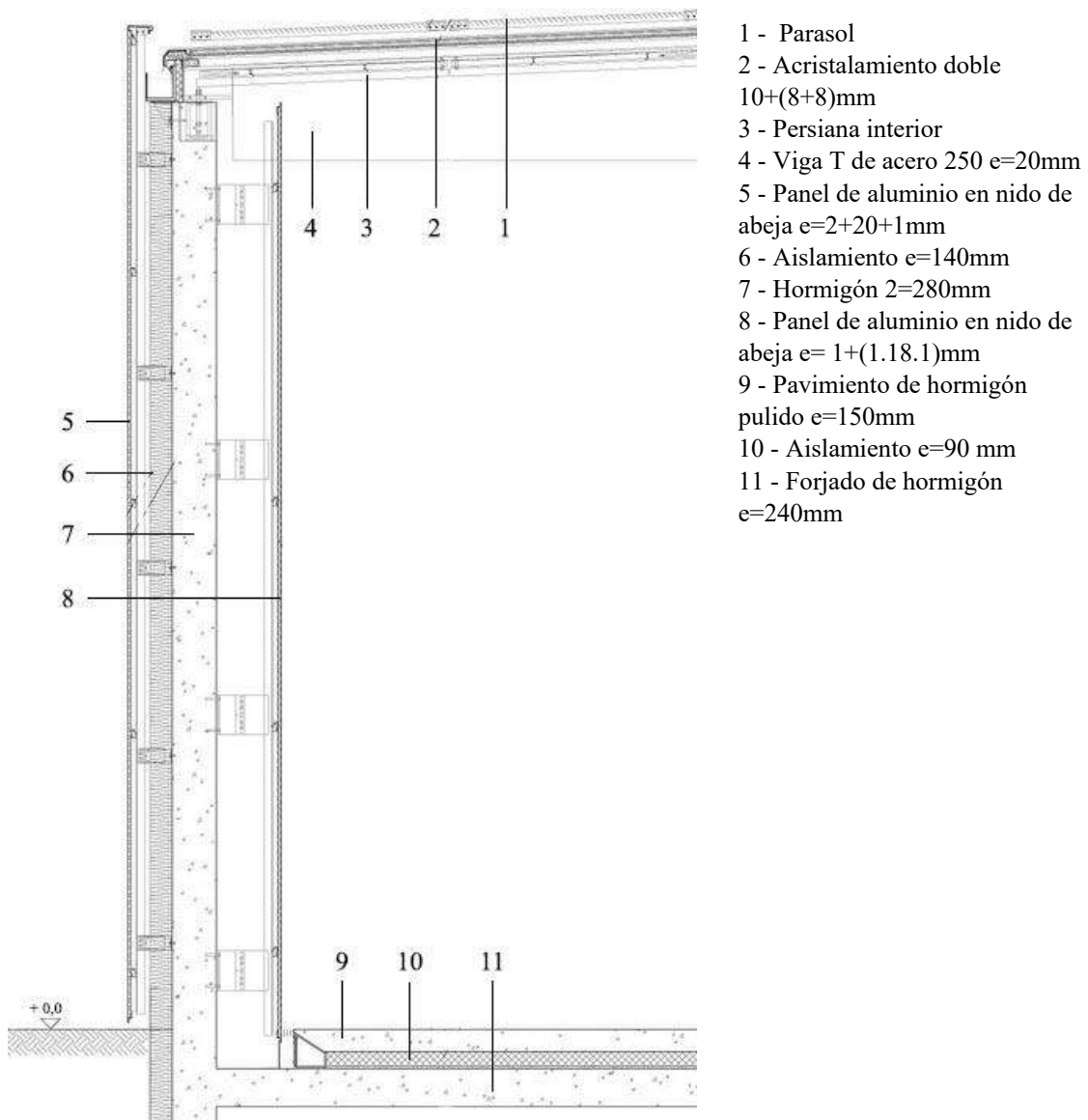


Fig. 56 Sección constructiva del muro del pabellón de los Tiempos [65]

Igual que en el caso de Selfridges de Birmingham, el museo Louvre Lens, se sitúa en una zona con un clima muy similar. El nivel promedio más alto de lluvia es durante el mes de octubre de 51 milímetros y el más bajo durante el mes de abril de 34 milímetros . Algo característico de esta zona es que la temperatura generalmente varía considerablemente entre la de noche y de día. Con todo esto, vemos que para la fachada de este museo se eligió usar el aluminio, todo eso por el buen comportamiento de aluminio en un medio húmedo.

4. Conclusiones

- 1) La ligereza del aluminio respecto a los otros metales, densidad $2,7 \text{ g/cm}^3$ y su resistencia a la corrosión, son las propiedades que justifican su elección relacionadas con los ejemplos de aplicación en estructuras de baja altura, la temporalidad de la obra, la rapidez de la ejecución y la versatilidad de fabricación de las piezas. Inclusive con algunas técnicas se pueden conseguir aluminios espumados más ligeros hasta alcanzar $0,2 \text{ g/cm}^3$. Resumiendo:
 - para una obra temporal se eligió el aluminio para el Pabellón Centenario de Jean Prouvé (original de 1954), que aparte de servir de propaganda del material, facilitaba la rapidez del desmontado una vez que terminara la exposición;
 - para no sobrecargar un suelo no muy resistente, el aluminio fue ideal para anclar a una losa los pilares de los comedores de la Seat en Barcelona (1956);
 - las variadas formas de fabricación y de unión que permiten su fácil industrialización se ven en la casa prototipo de Toyo Ito (2004), además de la facilidad para el transporte; y
 - la novedosa espuma de aluminio que mejoró su fabricación hacia 1963 permite el relleno o núcleos rigidizadores de montantes y de paneles y amplía su uso en estructuras y en particiones.

- 2) Las otras propiedades importantes, su resistencia a la corrosión aumentada por las aleaciones y anodizado, respondiendo bien a ambientes agresivos, y por las facilidades en la fabricación por laminado, extrusión, forja, moldeado, tratamientos térmicos y acabados, permiten el uso en exteriores como en las envolventes analizadas. En todos estos casos el aluminio ha sido anclado mediante tornillos o montantes a las estructura de hormigón, aunque podría ser metálica también, como hemos visto:
 - piezas de aluminio moldeado acanalado para aumentar su dureza y rigidez en exteriores y en las lamas que permiten el paso de iluminación en el Museo de Bellas Artes de Mansilla y Tuñón (2000);
 - paneles anclados que se adaptan a la forma orgánica en el caso de Selfridges de Jan Kaplický y Amanda Levete (2003) en las que el anodizado contribuye a reflejar el exterior que va cambiando a lo largo del día;
 - paneles espumados en el caso de la Iglesia Evangélica de Carlos y Lucía Ferrater (2010) con la intención de mejorar el aislamiento; y
 - doble piel con paneles con núcleo de nido de abeja en el Louvre Lens de Sanaa (2012) también para mejorar su aislamiento térmico y acentuar el reflejo de las superficies.

- 3) Finalmente, el aluminio que se usa actualmente es reciclado en gran parte, por lo que el aluminio que usamos se puede reciclar indefinidamente y si se quieren reformar las estructuras y envolventes, éstas pasan a formar parte de la materia prima.

Fuente de las tablas e imágenes

- [1] Autora en base a: es.statista.com/estadisticas/635357/paises-lideres-en-la-produccion-de-aluminio-a-nivel-mundial/
- [2] Hegger et al (2006) “Construction Materials Manual”, Birkhäuser, Edición Detail
- [3] W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 266
- [4] W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 267
- [5] W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 276
- [6] Combinación de 2 tablas del libro W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 379 y 380
- [7] Tabla de la autora, en base a la información encontrada
- [8 y 9] Hegger et al (2006) “Construction Materials Manual”, Birkhäuser, Edición Detail
- [10] ayudahispano-3000.blogspot.com/2015/12/minerales-por-cation_19.html
- [11] www.aluar.com.ar/seccion/aplicaciones/43/61
- [12] andrecardenas2016.blogspot.com/2016/02/p-roceso-bayer-el-proceso-bayer.html
- [13] www.alamy.es/imagenes/san-gioacchino.html
- [14] Peter Domone and John Ilston. *Construction Materials. Their Nature and Behaviour*. ed. Spon Press 2010.
- [15] W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 69
- [16] W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 67
- [17] W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 72
- [18] proyectos4etsa.wordpress.com/2015/02/10/pabellon-centenario-del-aluminio-1954-paris-jean-prouve/
- [19] proyectos4etsa.wordpress.com/2015/02/10/pabellon-centenario-del-aluminio-1954-paris-jean-prouve/
- [20] Laura Armesto Pineda. Los cerramientos verticales de Jean Prouvé Variables del intercambio con el exterior. Tesis doctoral. 2015. pág. 97
- [21] Croquis de la autora
- [22] Laura Armesto Pineda. Los cerramientos verticales de Jean Prouvé Variables del intercambio con el exterior. Tesis doctoral. 2015. pág. 97
- [23] Laura Armesto Pineda. Los cerramientos verticales de Jean Prouvé Variables del intercambio con el exterior. Tesis doctoral. 2015. pág. 97
- [24] Dibujado por la autora
- [25] Laura Armesto Pineda. Los cerramientos verticales de Jean Prouvé Variables del intercambio con el exterior. Tesis doctoral. 2015. pág. 113
- [26] Croquis de la autora
- [27] Croquis de la autora
- [28] Plano de la autora en base a hipótesis
- [29] Plano de la autora en base a hipótesis
- [30] Redibujado por la autora en base a: Laura Armesto Pineda. Los cerramientos verticales de Jean Prouvé Variables del intercambio con el exterior. Tesis doctoral. 2015. pág. 102
- [31] Redibujado por la autora en base a: Laura Armesto Pineda. Los cerramientos verticales de Jean Prouvé Variables del intercambio con el exterior. Tesis doctoral.
- [32] www.redfundamentos.com/blog/e/obras/detalle-26/
- [33] Memoria del proyecto: “Comedores para invitados y obreros de la Fábrica de automóviles Seat en Barcelona 1956”, pág. 7

- [34] AACC 02 arquitecturas contemporáneas. Comedores de la Seta. Ortiz – Echagüe, Barbero y de la Joya. T6 ediciones. 1999. pág. 15
- [35] AACC 02 arquitecturas contemporáneas. Comedores de la Seta. Ortiz – Echagüe, Barbero y de la Joya. T6 ediciones. 1999. pág. 14
- [36] Croquis de la autora
- [37] Croquis de la autora
- [38] Tectonica 22. Aluminio. pág. 38
- [39] Plano de la autora en base a: Tectonica 22. Aluminio. pág. 42
- [40] Plano de la autora en base a: Tectonica 22. Aluminio. pág. 42
- [41] Plano de la autora en base a: Tectonica 22. Aluminio. pág. 42
- [42] Plano de la autora en base a: Tectonica 22. Aluminio. pág. 43
- [43] Plano de la autora en base a: Tectonica 22. Aluminio. pág. 46
- [44] espumadealuminio.blogspot.com/p/revision.html
- [45] espumadealuminio.blogspot.com/p/revision.html
- [46] www.noticiascv.com/talleres-museo-de-bellas-artes-castellon/
- [47] gruposolve.es/portfolio/museo-de-bellas-artes-de-castellon/
- [48] Plano del arquitecto
- [49] Plano del arquitecto
- [50] Plano del arquitecto
- [51] Plano del arquitecto
- [52] Plano del arquitecto
- [53] www.pinterest.es/pin/406661041323434970/
- [54] funytrack.blogspot.com/2011/03/world-strangest-buildings.html
- [55] Redibujado por la autora en base a: www.jmhdezhdez.com/2012/04/selfridges-birmingham-future-systems.html
- [56] ferrater.com/?oab_proyecto=iglesia-evangelica-en-terrassa&idioma=_es
- [57] ferrater.com/?oab_proyecto=iglesia-evangelica-en-terrassa&idioma=_es
- [58] www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-187463/templo-evangelico-en-terrassa-oab
- [59] Redibujado por la autora en base a: www.archdaily.co/catalog/co/products/2810/revestimiento-paneles-de-aluminio-alusion-hunter-douglas
- [60] Redibujado por la autora en base a: www.archdaily.co/catalog/co/products/2810/revestimiento-paneles-de-aluminio-alusion-hunter-douglas
- [61] www.baunetz.de/meldungen/MeldungenLouvre_Lens_von_SANAA_eroeffnet_3021443.html
- [62] El croquis 179/180 Sanaa 2011- 2015. Kazuyo Sejima y Ryue Nishizawa. pág. 49
- [63] www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-228900/louvre-lens-sanaa
- [64] www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-228900/louvre-lens-sanaa
- [65] El croquis 179/180 Sanaa 2011- 2015. Kazuyo Sejima y Ryue Nishizawa. pág. 59

Bibliografía

- (1) W. Hufnagel. Manual del aluminio. Barcelona. Editorial Reverté 1992. pág. 1133. Versión en español.
- (2) Ingenieros del grupo Pechiney: Pierre Barrand y Robert Gadeau. Enciclopedia del aluminio vol I. Bilbao. Editorial Urmo, S.A. de ediciones 1981. pág. 300. Versión en español.
- (3) Ingenieros del grupo Pechiney: Pierre Barrand y Robert Gadeau. Enciclopedia del aluminio vol II. Bilbao. Editorial Urmo, S.A. de ediciones 1968. pág. 314. Versión en español.
- (4) Tectónica 22. Aluminio, ATC ediciones S.L. Madrid 1995. José Benito Rodríguez Cheda. El aluminio en la construcción. pág. 122.
- (5) Berge, B., Butters, C. & Henley, F. The ecology of building materials. Oxford. Architectural Press, 2ª ed. 2009.
- (6) Hegger et al (2006). Construction Materials Manual. Birkhäuser, Edición Detail
- (7) Laura Armesto Pineda. Los cerramietos verticales de Jean Prouvé Variables del intercambio con el exterior. Tesis doctoral. 2015. pág. 229
- (8) Informes de la Construcción Vol 9, nr 90, abril 1957. El premio R.S.Reynolds. Memorial.
- (9) Memoria del proyecto: “Comedores para invitados y obreros de la Fábrica de automóviles Seat en Barcelona 1956”. pág. 177
- (10) Tectónica 22. Aluminio, ATC ediciones S.L. Madrid 1995. Álvaro Varela. Casa de aluminio en Tokio Toyo Ito. pág. 122
- (11) J.A. Gutiérrez-Vázquez y J. Oñoro. Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones, revista de metalurgia, 44(5). septiembre-octubre. 457-476, 2008, DOI: 10.3989/revmetalm.0751
- (12) Bernabé Cárcel González. Efectos de la estructura celular sobre el comportamiento mecánico de espumas de aluminio de poro cerrado obtenidas por fusión. Aplicación en absorbedores de energía. Tesis doctoral. 2015. pág. 228
- (13) El Croquis 161. Mansilla + Tuñón. Madrid 2012. pág. 410. Museo de bellas artes de Castellón.
- (14) Croquis 179/180. Sanaa. Madrid 2015. pág. 399. Louvre-Lens.
- (15) <https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>
- (16) <https://es.statista.com/estadisticas/635357/paises-lideres-en-la-produccion-de-aluminio-a-nivel-mundial/>
- (17) www.asoc-aluminio.es/asociados/extruidores/extrusion-del-aluminio
- (18) <https://www.alu-stock.es/es/informacion-tecnica/comportamiento/>
- (19) proyectos4etsa.wordpress.com/2015/02/10/pabellon-centenario-del-aluminio-1954-paris-jean-prouve/
- (20) www.redfundamentos.com/blog/e/obras/detalle-26/
- (21) www.aq.upm.es/Departamentos/Proyectos/PROYECTO-ALPHA-web/PROYECTO-ALPHA-050/C2/PK-SAKURA/ZX-principal.htm
- (22) www.elcultural.com/revista/arte/Museo-de-Bellas-Artes-de-Castellon-de-Tunon-y-Mansilla/2740
- (23) www.via-arquitectura.net/09/09-124.htm
- (24) www.jmhdezhdez.com/2012/04/selfridges-birmingham-future-systems.html
- (25) terrassaenlamira.com/2017/08/04/iglesia-evangelica-sobriedad-protestante/

- (26) www.archdaily.co/co/02-187463/templo-evangelico-en-terrassa-oab
- (27) www.metalocus.es/es/noticias/inauguracion-musee-louvre-lens-por-sanaa
- (28) <https://papiro.unizar.es/ojs/index.php/zarch/article/view/1532/1758>