

MANUAL TÉCNICO DE FACHADAS VENTILADAS Y OPTIMIZACIÓN DE PANEL COMPOSITE

Documento de Ingeniería y Especificación Técnica para Arquitectura, Aparejos y Construcción Especializada

1. INTRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN DEL PANEL COMPOSITE

El panel composite de aluminio (ACM, por sus siglas en inglés *Aluminum Composite Material*) representa una de las soluciones tecnológicas más eficientes para la envolvente térmica y arquitectónica de edificaciones contemporáneas bajo el concepto de fachada ventilada. Su diseño se fundamenta en un principio biomecánico y estructural clásico: la sección en sándwich, que maximiza la inercia con el mínimo consumo de masa material.

Estructura Sándwich y Dimensionamiento Estándar

El panel estándar se compone de tres estratos solidarios mediante procesos de laminación termomecánica continua:

- **Piel Exterior:** Hoja de aluminio de aleación serie 3000 o 5000 (típicamente AlMn1Mg1 o similar) con un espesor nominal de **0.5 mm**. Esta lámina recibe los tratamientos superficiales de protección y acabado arquitectónico.
- **Núcleo Central:** Alma extrusionada de material polimérico o compuesto mineral con un espesor de **3.0 mm**.
- **Piel Interior:** Hoja de aluminio de idéntica aleación a la exterior, con un espesor de **0.5 mm**, habitualmente protegida con un lacado de servicio *washcoat* para evitar la corrosión por contacto o ambiental en la cámara de aire.

El resultado es un **espesor total estándar de 4.0 mm**. Esta configuración geométrica es la idónea para fachadas, puesto que un espesor inferior (como 3.0 mm) penaliza drásticamente la resistencia al pandeo local, y espesores superiores (6.0 mm) incrementan el peso propio sin aportar ventajas proporcionales en luces admisibles.

Relación Peso/Rigidez y Comportamiento Mecánico

La gran ventaja del panel composite radica en su **altísima rigidez específica**. Al separar las dos pieles de aluminio de alta resistencia mediante un núcleo de baja densidad, el momento de inercia de la sección transversal aumenta exponencialmente.

El comportamiento mecánico ante solicitaciones de flexión (debidas fundamentalmente a la presión y succión del viento) se asemeja al de una viga en celosía o doble T: las pieles de aluminio absorben las tensiones axiales de tracción y compresión, mientras que el núcleo asume el esfuerzo cortante (τ).

- **Rigidez a la flexión ($E \cdot I$):** Un panel composite de 4.0 mm ofrece una rigidez equivalente a la de una chapa maciza de aluminio de 3.3 mm de espesor, pero con una **reducción de peso de hasta el 40%**, situándose en torno a los $5.5 - 7.5 \text{ kg/m}^2$ (dependiendo de la densidad del núcleo).
- **Deformación por esfuerzo cortante:** Debido a que el módulo de elasticidad transversal (G) del núcleo es significativamente inferior al del aluminio ($G_{\text{alu}} \approx 27,000 \text{ MPa}$), las deformaciones por cortante en el núcleo no son despreciables en el cálculo de la flecha total. La formulación para la flecha máxima (ω) bajo carga uniformemente distribuida debe incorporar el término de deformación por cortante (teoría de flexión de placas de Reissner-Mindlin):

$$\omega_{\text{total}} = \omega_{\text{flexión}} + \omega_{\text{cortante}} = \frac{5 q L^4}{384 E I} + \frac{q L^2}{8 G A_s}$$

Donde A_s es el área reducida a cortante de la sección. Ignorar el segundo término en el cálculo analítico de luces entre fijaciones puede derivar en patologías por deformaciones excesivas o colapso de las pestañas de cuelgue.

Sistemas de Lacado Protector Exterior: PVDF frente a Polyester (PE)

La durabilidad estética y funcional del panel depende directamente del recubrimiento de la cara expuesta. Se diferencian tecnológicamente dos macrotipos de lacado continuo (*Coil Coating*):

1. **PVDF (Polifluoruro de Vinilideno) con Resina 70/30:** Es el estándar de calidad superior para fachadas expuestas a la intemperie. La matriz del lacado está compuesta por un 70% de resinas de fluoropolímero (PVDF) y un 30% de resinas acrílicas. Los enlaces químicos Carbono-Flúor (C-F) son de los más fuertes que existen en la química orgánica, dotando al recubrimiento de una inercia química casi absoluta.
 - **Durabilidad UV:** Clasificación **UV Ruv4** (según EN 10169), la más alta resistencia a la degradación por radiación solar, garantizando la estabilidad del color (ΔE) y del brillo durante décadas.
 - **Resistencia a la corrosión:** Clasificación **RC5** (ambientes industriales y marinos severos).
2. **Polyester (PE):** Recubrimiento basado en resinas poliméricas convencionales. Su uso queda estrictamente restringido a aplicaciones de interiores, señalética o falsos techos protegidos. Expuesto a la radiación UV exterior, sufre un proceso de "tizado" o calcinación, rompiéndose las cadenas poliméricas, lo que provoca la pérdida de brillo, alteración cromática y posterior agrietamiento de la capa protectora.

2. CLASIFICACIÓN DE NÚCLEOS Y CUMPLIMIENTO DEL CTE

El comportamiento frente al fuego es el criterio crítico de especificación para fachadas en la edificación multifamiliar y pública. La naturaleza del núcleo central determina la clasificación del panel según las Euroclases de reacción al fuego (Norma UNE-EN 13501-1).

Tipologías de Núcleo

- **Núcleo PE (Polietileno estándar):** Compuesto al 100% por polietileno de baja densidad (LDPE). Es un material termoplástico altamente combustible que aporta una carga de fuego elevada y goteo de partículas inflamadas en caso de incendio. Su uso está prohibido en fachadas en gran parte de las tipologías edificatorias.
- **Núcleo FR (Fire Retardant):** Núcleo de base polimérica densamente cargado con retardantes de llama minerales (típicamente trihidróxido de aluminio, $\text{Al}(\text{OH})_3$, o hidróxido de magnesio, $\text{Mg}(\text{OH})_2$). Al alcanzar altas temperaturas, estos compuestos liberan agua de cristalización de forma endotérmica, sofocando la llama y reduciendo la emisión de humos.
- **Núcleo A2 (Mineral No Combustible):** Núcleo constituido casi en su totalidad (más del 90%) por compuestos minerales inertes cementados. Prácticamente no contiene resinas orgánicas combustibles, anulando cualquier posibilidad de propagación vertical del fuego a través del alma de la fachada.

Tabla Comparativa de Euroclases de Reacción al Fuego

Propiedad / Clasificación	Núcleo PE	Núcleo FR	Núcleo A2
Euroclase Principal	E (Combustible, alta contribución)	B (Muy limitada contribución al fuego)	A2 (No combustible, sin contribución)
Producción de Humos	No clasificado (s3 implícito)	s1 (Producción de humo nula o muy débil)	s1 (Producción de humo nula o muy débil)

Caída de Gotas/Partículas	No clasificado (d2 implícito)	d0 (No se producen gotas ni partículas)	d0 (No se producen gotas ni partículas)
Clasificación Completa	E	B - s1, d0	A2 - s1, d0

Explicación de las Normativas de Seguridad: CTE DB-SI en España

El Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio (**CTE DB-SI 2**, sección 1 - Propagación exterior), endureció notablemente los requerimientos para limitar el riesgo de propagación vertical de incendios a través de las fachadas ventiladas, debido a que el propio diseño de la cámara de aire genera un "efecto chimenea" que acelera el tiro térmico de las llamas.

De acuerdo con la última revisión normativa, la clase de reacción al fuego de los materiales que ocupen más del 10% de la superficie del acabado exterior de la fachada o de las superficies interiores de la cámara de aire debe cumplir con los siguientes límites métricos:

- Edificios con altura de fachada ≤ 10 metros:** Se permite una clasificación mínima **C - s3, d2**. Por lo tanto, en estas tipologías (viviendas unifamiliares de baja altura o naves aisladas), el uso de núcleos tipo **FR (B-s1,d0)** cumple holgadamente la exigencia legal, quedando descartado el uso de PE convencional.
- Edificios con altura de fachada > 10 metros y ≤ 18 metros:** El CTE exige una clasificación mínima **B - s3, d0**. En este rango de altura (típico bloque residencial de hasta 5-6 plantas), es estrictamente obligatorio prescribir e instalar paneles con núcleo **FR (B-s1,d0)**, ya que el goteo inflamado (d2) está tajantemente prohibido.
- Edificios con altura de fachada > 18 metros:** El CTE establece que la clasificación obligatoria debe ser **B - s3, d0** como mínimo. No obstante, en la praxis de la ingeniería de fachadas y debido al solape de riesgos en edificios de gran altura (torres residenciales u hospitales), es altísimamente recomendable y exigido por muchas direcciones técnicas la prescripción de paneles con núcleo **A2 - s1, d0** para mitigar por completo la carga de fuego.
- Puntos singulares (Arranques de fachada accesibles al público o pasillos de evacuación):** Independientemente de la altura total, se tiende a prescribir **A2** en zonas susceptibles de vandalismo o incendios fortuitos en base a suelo (contenedores de basura adyacentes).

3. FORMATOS COMERCIALES Y APROVECHAMIENTO

La rentabilidad económica de un proyecto de fachada ventilada de panel composite está directamente ligada al diseño geométrico del despiece y a la optimización del material en el proceso de corte y fresado industrial.

Dimensiones Comerciales Comunes

Los fabricantes suministran el panel composite en bobinas laminadas cortadas a formatos normalizados. El ancho estándar de fabricación en Europa está unificado principalmente en **1500 mm** (ocasionalmente 1250 mm o 2000 mm bajo pedido de gran volumen), ya que se adapta de forma óptima a las modulaciones arquitectónicas de forjado a forjado y vanos de ventana. Los largos estándar más frecuentes son:

- $5000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$
- $4050 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$
- $3200 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$

Importancia del Kerf (Broca de Corte) en el Mecanizado CNC

En la fase de preparación de los archivos de corte (*cams*) para los centros de mecanizado por fresado a control numérico (CNC), se debe introducir obligatoriamente la variable física del **Kerf**. El Kerf es el ancho de la ranura de material que la herramienta (fresa helicoidal de corte) elimina por completo al separar dos piezas independientes.

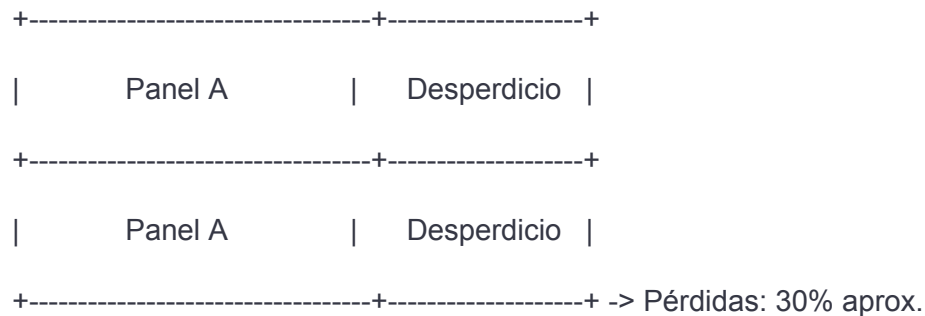
- Para el panel composite se utilizan comunmente brocas de metal duro de diámetro $\varnothing = 4.0 \text{ mm}$ o $\varnothing = 6.0 \text{ mm}$.
- *Incidencia matemática:* Si se diseña un despiece lineal donde se requieren 4 piezas seguidas de exactamente 1000 mm de longitud a partir de una placa comercial, el cálculo lineal bruto indicaría una necesidad de 4000 mm . Sin embargo, al aplicar 3 cortes con una broca de 6.0 mm , el consumo real de material destruido por el mecanizado es de $3 \times 6 = 18 \text{ mm}$. La longitud mínima requerida real de la chapa matriz será de 4018 mm . Omitir el Kerf en el despiece de compras genera roturas de stock y paneles finales con dimensiones fuera de tolerancia geométrica.

El Concepto de Nesting (Anidado Computacional)

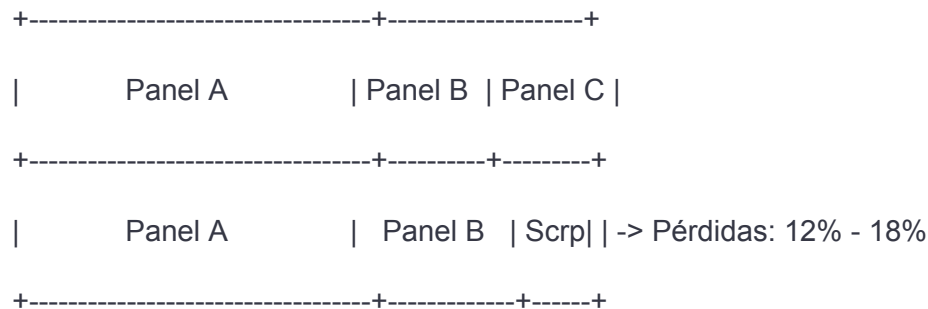
El *Nesting* es la técnica matemática orientada a organizar geoméricamente las piezas bidimensionales de despiece (paneles planos o desarrollos de bandejas) dentro de los formatos comerciales de chapa matriz con el objetivo de maximizar el área útil y reducir el desperdicio (*scrap*).

Un despiece tradicional realizado de forma empírica o manual por filas de producción suele arrojar un desperdicio de material del orden del **25% al 35%**, debido a la incapacidad humana de resolver combinaciones complejas de múltiples formatos en grandes volúmenes de placas.

MÉTODO TRADICIONAL (Filas simétricas):



MÉTODO NESTING (Motores Computacionales):



Para mitigar este sobrecoste, la ingeniería de fachadas utiliza motores computacionales de optimización que resuelven variantes del problema matemático de empaquetamiento (*Bin Packing Problem*), considerado un problema de complejidad NP-dura. Los algoritmos implementados combinan dos estrategias principales:

1. **Algoritmos de tipo MaxRects (Maximal Rectangles):** Evalúan de forma heurística las áreas rectangulares libres remanentes cada vez que se posiciona una pieza, minimizando la fragmentación del espacio sobrante para permitir que quepan piezas de mediano formato posteriores.
2. **Algoritmos Genéticos y Evolutivos:** Generan poblaciones de soluciones virtuales aleatorias combinando rotaciones (siempre respetando la dirección de laminación del aluminio por motivos estéticos de reflexión de luz) y posiciones de las piezas. Mediante iteraciones sucesivas que imitan la selección natural, el software descarta las combinaciones ineficientes y muta las más óptimas.

La aplicación rigurosa de estos motores de Nesting computacional permite reducir el desperdicio real en proyectos de fachada a niveles controlados de entre el **12% y el 18%**, lo cual reduce el impacto ambiental de la obra y genera un ahorro directo e inmediato en el presupuesto de ejecución material del capítulo de revestimientos.