Instituto de
Tecnología de la Construcción
de Cataluña

CRITERIOS ITeC

Cálculo simplificado para comprobar la unión adhesiva en sistemas de revestimiento de fachada ventilada

Imagen proporcionada por SIKA SAU

María Bento Fernández
Departamento de Calidad de Productos
ITeC - Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña

Barcelona, 1 de julio de 2020

Índice

1. Introducción 3
2. Alcance 4
3. Sistema de adhesivo para revestimientos de fachada ventilada . 5
4. Cálculo de la unión adhesiva 7
4.1. Acción de peso propio 8
4.2. Acción del viento 10
4.3. Comprobación para combinación de la acción de peso y viento . 12
4.4. Acciones debidas a condiciones ambientales . . . 14
Anexo 1: Ejemplo de cálculo de la unión adhesiva . . . 18
A1.1. Datos de entrada 18
A1.2. Límite dimensional del panel condicionado por las variaciones de humedad y temperatura 20
A1.3. Acción de peso propio 21
A1.4. Acción de succión de viento . . . 22
A1.5. Comprobación para combinación de la acción de peso y viento 26
A1.6. Diseño final 27
Anexo 2: Justificación técnica para la ecuación (ec.9c) – Método 2 . 28

Barcelona, 1 de julio de 2020

1. Introducción

La comprobación de la unión adhesiva es un aspecto fundamental en los sistemas de fachada ventilada en los que la unión del panel de revestimiento a la subestructura metálica (normalmente formada por un perfil vertical y unas ménsulas para la fijación de estos perfiles a la estructura soporte) se hace mediante un sistema de adhesivo (formado principalmente por un cordón de adhesivo e imprimación para el pretratamiento de las superficies a unir, junto con otros componentes auxiliares tales como cinta adhesiva y agentes de limpieza de las superficies).

Los procedimientos para realizar esta comprobación, aun siendo relativamente sencillos, solo los podemos encontrar en la documentación técnica de cada fabricante de adhesivo. Hasta ahora no se ha establecido de un modo generalizado teniendo en cuenta la reglamentación española.

Habiendo detectado esta necesidad y basándonos en la experiencia adquirida en ITeC sobre la evaluación de sistemas de revestimiento de fachada de esta tipología, se recoge aquí un procedimiento simplificado de cálculo de la unión adhesiva.

.

Barcelona, 1 de julio de 2020

2. Alcance

Este documento se ha desarrollado para ser aplicado en sistemas de revestimiento exterior de fachada ventilada formados por elementos discontinuos (paneles, placas, lamas, etc.) fijados mediante un sistema de adhesivo a perfiles verticales metálicos.

El procedimiento de cálculo que aquí se desarrolla para la unión adhesiva es solo parte de las comprobaciones que se deben realizar sobre un sistema de fachada ventilada. Por tanto, no se considera aquí la comprobación de la resistencia y estabilidad de:

- Los paneles de revestimiento.
- Los perfiles verticales de la subestructura.
- Las ménsulas o escuadras de la subestructura.
- Cuando sea relevante, las fijaciones mecánicas complementarias de los paneles de revestimiento.
- Las fijaciones mecánicas entre las ménsuales y los perfiles.
- Los anclajes entre las ménsuales y la estructura soporte.
- La estructura soporte.

Barcelona, 1 de julio de 2020

3. Sistema de adhesivo para revestimientos de fachada ventilada

Un sistema de adhesivo para sistemas de revestimiento en fachada ventilada consta de los siguientes componentes (véase la figura 3.1):

1. Adhesivo: pasta generalmente basada en polímeros modificados de silano, poliuretanos, siliconas o polímeros híbridos.

   Un adhesivo se debe especificar por:

   - el tipo de material,

   - dimensiones mínimas del cordón (espesor y ancho mínimo),

   - sus propiedades físicas: densidad o peso específico, retracción, dureza, resistencia al alargamiento, análisis termogravimétrico, etc., y,

   - sus prestaciones mecánicas de diseño: resistencia a tracción, resistencia a cortante y desplazamiento a cortante.

2. Pretratamiento de superficies:

   - Imprimación: producto normalmente líquido que se aplica sobre las superficies a unir del panel y del perfil para mejorar la adherencia.

   - Agente de limpieza: producto normalmente líquido y volátil que se utiliza para la limpieza de las superficies a unir del panel y del perfil.

   Los productos de pretratamiento se deben especificar considerando el tipo de producto y el material de las superficies sobre las que está prevista su utilización.

3. Cinta adhesiva de doble cara: cinta cuya finalidad es doble, por un lado, se utiliza para la sujeción inicial de los paneles de revestimiento hasta el completo curado del adhesivo; y por otro, se utiliza para asegurar el espesor correcto del cordón de adhesivo. La cinta adhesiva se debe especificar por el tipo de material y sus dimensiones.

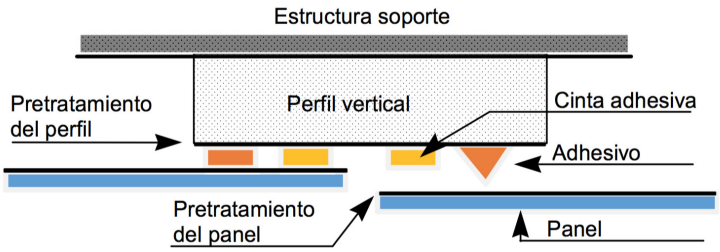


Figura 3.1: Composición de un sistema de adhesivo.

Las propiedades mecánicas de un sistema de adhesivo deben ser definidas por el fabricante.

Esta definición debe basarse en los valores obtenidos mediante ensayo siguiendo las metodologías armonizadas establecidas en los documentos de referencia a nivel europeo para este tipo de sistemas. P.ej. EAD 250005-00-0606 *Adhesivos para revestimientos de paredes* o el futuro EAD sobre *Kits para revestimientos exteriores de fachada adheridos a la subestructura*.

Si el sistema de adhesivo de un fabricante dispone del ETE (Evaluación Técnica Europea) correspondiente basado en alguno de los dos documentos EAD indicados en el párrafo anterior, todos los datos necesarios para el cálculo vendrán recogidos en dicho documento ETE (ETA en inglés).

Es muy importante tener en cuenta que los valores de diseño que normalmente definen los fabricantes son valores basados en la premisa de que el fallo de la unión adhesiva se produce por cohesión del adhesivo y nunca por adherencia entre el adhesivo y la superficie del panel o perfil. Es por este motivo que la imprimación del sistema de adhesivo tiene un papel fundamental en el comportamiento final de la unión adhesiva.

Para asegurar la adherencia, los fabricantes realizan ensayos de pelado (peel-test) sobre cada una de las superficies sobre las que se prevea la utilización del adhesivo. Estos ensayos de pelado también deben ser realizados tras ciclos de envejecimiento acelerado sobre las probetas.

4. Cálculo de la unión adhesiva

Debe comprobarse que la unión adhesiva resiste las siguientes acciones:

- Peso propio (véase el apartado 4.1).
- Viento (véase el apartado 4.2).
- Por condiciones ambientales (véase el apartado 4.4).

En el Anexo 1 se aporta un ejemplo de cálculo de resistencia de la unión adhesiva.

Barcelona, 1 de julio de 2020

4.1. Acción de peso propio

En cada proyecto debe justificarse mediante cálculo que la unión adhesiva resiste la acción de peso propio de los paneles de revestimiento que se consideren.

El valor límite de diseño que se debe considerar en los cálculos es el valor de diseño de resistencia a cortante (τ_{des}) definido por el fabricante, valor que debe ser comprobado a partir de los resultados de los ensayos de resistencia a cortante de la unión adhesiva a carga estática indicados en los procedimientos armonizados a nivel europeo.

Para los cálculos pueden utilizarse las siguientes ecuaciones en función de si el valor que se quiera determinar es:

- el peso máximo admisible (ec.1), o
- el ancho mínimo de cordón (ec.2).

$$Q_{pp} \cdot \gamma_{pp} \leq \frac{\tau_{cal} \cdot b_{min} \cdot N_b \cdot \gamma_1}{L_{clad}} \cdot 10^5 \qquad \text{(ec.1)}$$

$$b_{min} \geq \frac{Q_{pp} \cdot \gamma_{pp} \cdot L_{clad}}{\tau_{cal} \cdot N_b \cdot \gamma_1} \cdot 10^{-5} = b_{cort} \qquad \text{(ec.2)}$$

Donde:

- Q_{pp} (en kg/m²) = peso propio del panel.
- b_{min} (en mm) = ancho mínimo del cordón.
- b_{cort} (en mm) = ancho debido a la acción de cortante sobre el cordón.
- τ_{cal} (en MPa) = valor de cálculo de la resistencia permanente a cortante:

$$\tau_{cal} = \tau_{des} \cdot \gamma_t \cdot \gamma_{age} \qquad \text{(ec.3)}$$

Barcelona, 1 de julio de 2020

- τ_{des} (en MPa) = valor de diseño de la resistencia permanente a cortante definida por el fabricante.

- γ_t = factor de reducción en función de la temperatura de uso prevista. Dato que debe ser definido por el fabricante o establecido a partir de los valores de los ensayos según los procedimientos establecidos a nivel europeo.

- γ_{age} = factor de reducción por otras condiciones de envejecimiento (fatiga, hielo-deshielo, etc). Dato que debe ser definido por el fabricante o establecido a partir de los valores de los ensayos según los procedimientos establecidos a nivel europeo.

- N_b = número de líneas totales de cordones por panel. Es importante tener en cuenta que cada perfil puede incluir una o dos líneas de cordón de adhesivo.

- L_{clad} (en mm) = longitud del panel. Dimensión perpendicular a las líneas de cordones.

- γ_1 = factor de reducción por adherencia efectiva.

$$\gamma_1 = \frac{h_{eff}}{H_{clad}} \qquad \text{(ec.4)}$$

- h_{eff} (en mm) = longitud de cordón aplicado.

- H_{clad} (en mm) = ancho del panel. Dimensión paralela a las líneas de cordones.

- γ_{pp} = coeficiente de mayoración de la acción del peso propio. Según el DB SE del CTE; γ_{pp} = 1,35.

Barcelona, 1 de julio de 2020

4.2. Acción del viento

En cada proyecto debe justificarse mediante cálculo que la unión adhesiva resiste la acción de succión de viento ejercida sobre los paneles de revestimiento que se consideren.

El valor límite de diseño que se debe considerar en los cálculos es el valor de diseño de resistencia a tracción (σ_{des}) definido por el fabricante, valor que debe ser comprobado a partir de los resultados de los ensayos de resistencia a tracción de la unión adhesiva indicados en los procedimientos armonizados a nivel europeo.

Para los cálculos pueden utilizarse las siguientes ecuaciones en función de si el valor que se quiera determinar es:

A. la acción máxima a succión admisible, para:

- la situación con dos perfiles por panel (véase la figura 4.1a) o de perfiles extremos (ec.5a), o

- la situación con tres o más perfiles por panel (véase la figura 4.1b) (ec.5c), o

B. el ancho mínimo de cordón, para:

- la situación con dos perfiles por panel (véase la figura 4.1a) o de perfiles extremos (ec.6a), o

- la situación con tres o más perfiles por panel (véase la figura 4.1b) (ec.6c).

$$(Q_e \cdot \gamma_Q)_{ext} \leq \frac{\sigma_{cal} \cdot b_{min} \cdot n_{b\text{-}ext} \cdot \gamma_1}{K_{ext} \cdot l_b + l_{ext}} \cdot 10^3 \qquad \text{(ec.5a)}$$

$$(Q_e \cdot \gamma_Q)_{int} \leq \frac{\sigma_{cal} \cdot b_{min} \cdot n_{b\text{-}int} \cdot \gamma_1}{K_{int} \cdot l_p} \cdot 10^3 \qquad \text{(ec.5b)}$$

$$Q_e \cdot \gamma_Q \leq \min [\ \text{(ec.5a)} ; \text{(ec.5b)}\ ] \qquad \text{(ec.5c)}$$

Barcelona, 1 de julio de 2020

$$(b_{min})_{ext} \geq \frac{Q_e \cdot \gamma_Q \cdot (K_{ext} \cdot l_p + l_{ext})}{\sigma_{cal} \cdot n_{b\text{-}ext} \cdot \gamma_1} \cdot 10^{-3} \qquad \text{(ec.6a)}$$

$$(b_{min})_{int} \geq \frac{Q_e \cdot \gamma_Q \cdot K_{int} \cdot l_p}{\sigma_{cal} \cdot n_{b\text{-}int} \cdot \gamma_1} \cdot 10^{-3} \qquad \text{(ec.6b)}$$

$$b_{min} \geq \max\,[\ \text{(ec.6a)}\ ;\ \text{(ec.6b)}\ ] = b_{tens} \qquad \text{(ec.6c)}$$

Donde:

- Q_e (en kN/m²) = succión de viento.

- K_{ext} o K_{int} = constante en función del número de perfiles (véase la tabla 4.1).

Situación	K_{ext}	K_{int}
2 perfiles	0,50	---
3 perfiles	0,375	1,25
4 o más perfiles	0,40	1,10

Tabla 4.1: Constantes para ecuaciones según número de perfiles.

- b_{min} (en mm) = ancho mínimo del cordón.

- b_{tens} (en mm) = ancho debido a la acción de tensión sobre el cordón.

- σ_{cal} (en MPa) = valor de cálculo de la resistencia a tracción:

$$\sigma_{cal} = \sigma_{des} \cdot \gamma_t \cdot \gamma_{age} \qquad \text{(ec.7)}$$

- σ_{des} (en MPa) = valor de diseño de la resistencia a tracción definida por el fabricante.

- γ_t = factor de reducción en función de la temperatura de uso prevista. Dato que debe ser definido por el fabricante o establecido a partir de los valores de los ensayos según los procedimientos establecidos a nivel europeo.

- γ_{age} = factor de reducción por otras condiciones de envejecimiento (fatiga, hielo-deshielo, etc). Dato que debe ser definido por el fabricante o establecido a partir de los valores de los ensayos según los procedimientos establecidos a nivel europeo.

- $n_{b\text{-}ext}$ = número de líneas de cordones por perfil extremo.

- $n_{b\text{-}int}$ = número de líneas de cordones por perfil intermedio.

- l_p (en mm) = distancia entre perfiles verticales.

- l_{ext} (en mm) = distancia entre el perfil extremo y el borde del panel. Dimensión perpendicular a las líneas de cordones.

- γ_1 = factor de reducción por adherencia efectiva (véase la ec.4).

- h_{eff} (en mm) = longitud de cordón aplicado.

- H_{clad} (en mm) = ancho del panel. Dimensión paralela a las líneas de cordones.

- γ_Q = coeficiente de mayoración de la acción de viento. Según el DB SE del CTE; γ_Q = 1,50.

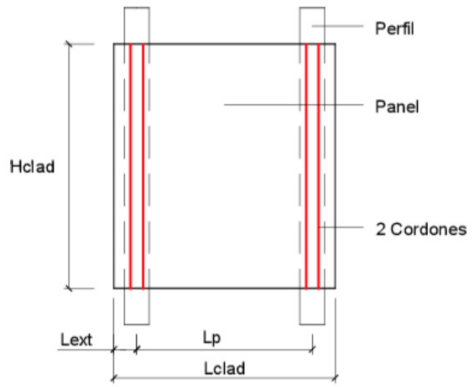
4.3. Comprobación para combinación de la acción de peso y viento

La combinación de la acción del peso propio y viento se comprueba a partir de los datos de ancho de cordón mínimo obtenido de las ecuaciones ec.2 y ec.6c.

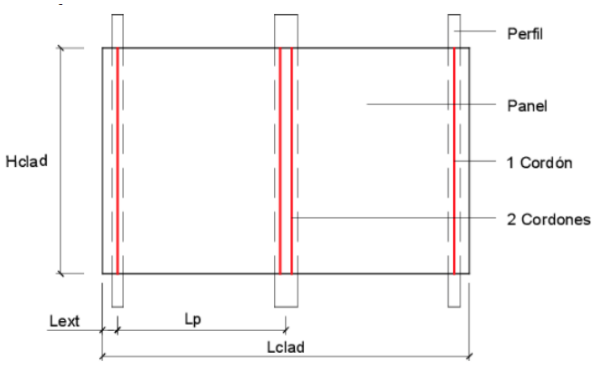
$$b_{min} \geq b_{total} = \sqrt{b^2_{cort} + b^2_{tens}} \qquad \text{(ec.8)}$$

Figura 4.1: Posibles configuraciones de cordones de adhesivo y perfiles verticales por panel.

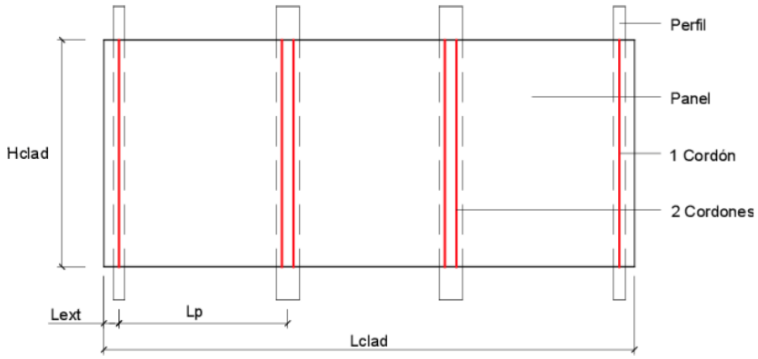
(a) Dos perfiles por panel con dos cordones por perfil



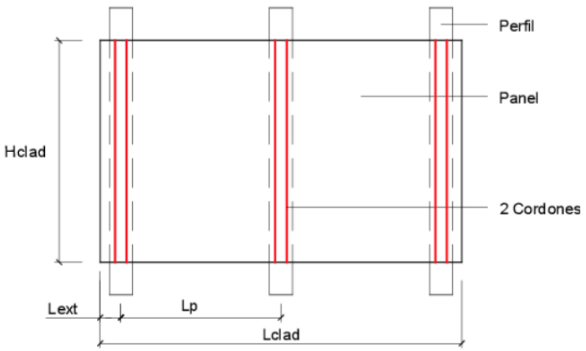
(b) Tres perfiles por panel con un cordón en los perfiles extremos



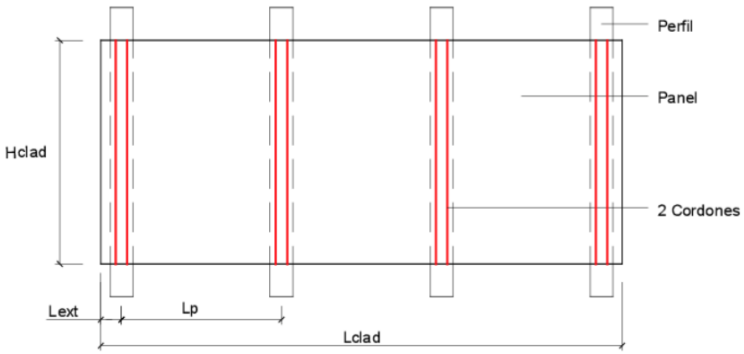
(c) Cuatro o más perfiles por panel con un cordón en los perfiles extremos



(d) Tres perfiles por panel con dos cordones en los perfiles extremos



(e) Cuatro o más perfiles por panel con dos cordones en los perfiles extremos



Barcelona, 1 de julio de 2020

4.4. Acciones debidas a condiciones ambientales

Las variaciones ambientales de temperatura y humedad (humedad relativa o por la lluvia), pueden producir movimientos diferenciales en los paneles de revestimiento y los perfiles verticales que deben ser absorbidos por el desplazamiento a cortante de la unión adhesiva.

El valor límite de diseño que se debe considerar en los cálculos depende del valor definido por el fabricante ($d_{s,des}$ o d_{s,C_lim} a partir de pruebas de cortante, o $\Delta L_{t,des}$, a partir de pruebas de tracción), valor que debe ser comprobado a partir de los resultados de resistencia a cortante de la unión adhesiva a carga estática indicados en los procedimientos armonizados a nivel europeo.

Para el cálculo del desplazamiento puede utilizarse la siguiente ecuación (ec.9a)[1].

$$d_s \geq \sqrt{\Delta L^2_v + \Delta L^2_h} \qquad \text{(ec.9a)}$$

El valor de "$d_{s,des}$" se puede obtener por alguno de los siguientes métodos:

- Método 1: considerando ensayos de resistencia a cortante bajo carga uniformemente aplicada[2].

  $$d_s = d_{s,des} = 40\% \times d_{s,C_lim} \qquad \text{(ec.9b)}$$

- Método 2: considerando movimientos por trigonometría (véase la justificación en el Anexo 2).

  $$d_s^2 = (t + \Delta L_{t,des})^2 - t^2 \qquad \text{(ec.9c)}$$

1 Cuando el proyectista lo considere necesario, bajo el soporte del fabricante del adhesivo, se podrá despreciar la combinación de movimientos indicada en la ecuación (ec.9a), es decir, se podrá comprobar de forma independiente: $d_s \geq \Delta L_v$ y $d_s \geq \Delta L_h$.

2 Método basado en la especificación KOMO®, apartado 4.1.3 del documento BRL 4101, sección 7.

Donde:

- d_s (en mm) = valor límite de desplazamiento absoluto del adhesivo.

- $d_{s,des}$ (en mm) = valor de diseño del desplazamiento a cortante del adhesivo. Valor que debe ser proporcionado por el fabricante del adhesivo.

- d_{s,C_lim} (en mm) = valor del desplazamiento en el límite elástico a cortante. Valor que se puede obtener del ensayo a cortante bajo carga uniformemente aplicada cuando "$d_{s,des}$" no ha sido definido o proporcionado por el fabricante del adhesivo.

- ΔL_v (en mm) = movimiento diferencial vertical.

- ΔL_h (en mm) = movimiento diferencial horizontal.

- $\Delta L_{t,des}$ (en mm) = valor de diseño de la deformación a tracción del adhesivo. Valor que debe ser proporcionado por el fabricante del adhesivo.

- t (en mm) = espesor del cordón de adhesivo.

Los movimientos diferenciales ΔL_v y ΔL_h dependen de los valores de expansión térmica lineal de los paneles de revestimiento y de los perfiles verticales, así como, de la variación dimensional por cambios en la humedad relativa ambiental para determinados materiales de paneles de revestimiento (p.ej. laminados HPL, piedra aglomerada, etc.).

$$\Delta L_v = \left| \Delta L_{vT^a} \pm \Delta L_{v,RH} \right| \qquad \text{(ec.10a)}$$

$$\Delta L_h = \left| \Delta L_{hT^a} \pm \Delta L_{h,RH} \right| \qquad \text{(ec.10b)}$$

Nota: Signo positivo (+) indica el peor caso, movimientos en sentidos opuestos. Signo negativo (-) indica el mejor caso, movimientos en el mismo sentido.

Barcelona, 1 de julio de 2020

En el caso de la expansión térmica lineal, los movimientos diferenciales se pueden calcular según se indica en las siguientes ecuaciones:

$$\Delta L_{vT^a} = \left| [(\alpha_{clad} \cdot \Delta T_{clad}) - (\alpha_p \cdot \Delta T_p)] \cdot \frac{H_{clad}}{2} \right| \qquad \text{(ec.11a)}$$

$$\Delta L_{hT^a} = \left| [(\alpha_{clad} \cdot \Delta T_{clad}) - (\alpha_w \cdot \Delta T_w)] \cdot \frac{L_{clad}}{2} \right| \qquad \text{(ec.11b)}$$

Nota: Signo negativo (-), movimientos en el mismo sentido, en ambos casos debidos a la temperatura.

Donde:

- L_{clad} (en mm) = longitud del panel. Dimensión perpendicular a las líneas de cordones.

- H_{clad} (en mm) = ancho del panel. Dimensión paralela a las líneas de cordones.

- α_{clad} (en mm/(mm · ºC) = coeficiente de expansión térmica lineal del panel de revestimiento.

- α_p (en mm/(mm · ºC) = coeficiente de expansión térmica lineal del perfil.

- α_w (en mm/(mm · ºC) = coeficiente de expansión térmica lineal del muro soporte.

- ΔT_{clad} (en ºC) = diferencia de temperatura del panel de revestimiento.

$$\Delta T_{clad} = T_{0,clad} - T_{1,clad} \qquad \text{(ec.12)}$$

- ΔT_p (en ºC) = diferencia de temperatura del perfil.

$$\Delta T_p = T_{0,p} - T_{1,p} \qquad \text{(ec.13)}$$

- ΔT_w (en ºC) = diferencia de temperatura del muro soporte.

$$\Delta T_w = T_{0,w} - T_{1,w} \qquad \text{(ec.14)}$$

- $T_{0,i}$ (en ºC) = temperatura en el panel, perfil o muro cuando el adhesivo es aplicado. Como referencia se puede considerar, $T_{0,i}$ = 10 ºC, temperatura de montaje según el apartado 3.4.2 del DB SE-AE del CTE.

- $T_{1,i}$ (en ºC) = temperatura en servicio del panel, perfil o muro. Como referencia se pueden considerar los criterios indicados en el apartado 3.4.2 del DB SE-AE del CTE.

En el caso de los movimientos del panel debidos a la variación dimensional por cambios en la humedad relativa ambiental, los movimientos diferenciales se pueden calcular según se indica en las siguientes ecuaciones:

$$\Delta L_{v,RH} = VD_v \cdot \frac{H_{clad}}{2} \qquad \text{(ec.15a)}$$

$$\Delta L_{h,RH} = VD_h \cdot \frac{L_{clad}}{2} \qquad \text{(ec.15b)}$$

Donde:

- VD_v (en mm/m) = variación dimensional transversal del panel debida a la humedad.
- H_{clad} (en m) = ancho del panel. Dimensión paralela a las líneas de cordones.
- VD_h (en mm/m) = variación dimensional longitudinal del panel debida a la humedad.
- L_{clad} (en m) = longitud del panel. Dimensión perpendicular a las líneas de cordones.

Dependiendo del diseño final de sistema de revestimiento exterior, algunos movimientos pueden despreciarse. P.ej. el movimiento horizontal del muro soporte cuando éste incorpora juntas de dilatación.

Barcelona, 1 de julio de 2020

Anexo 1 - Ejemplo de cálculo de la unión adhesiva

A.1.1. Datos de entrada

Sistema de fachada ventilada con panel HPL (según UNE-EN 438-7) y subestructura de aluminio. Los datos de los componentes son:

- Sistema de adhesivo:

  • Espesor mínimo del cordón de adhesivo: t_{min} = 3 mm.

  • Ancho mínimo del cordón de adhesivo: b_{min} = 12 mm.

  • Resistencia de diseño a tracción: σ_{des} = 0,15 MPa.

  • Resistencia de diseño a cortante: τ_{des} = 0,12 MPa.

  • Desplazamiento de diseño: $\Delta L_{t,des}$ = 1,0 mm.

  • Factor de reducción en función de la temperatura de uso prevista: γ_t = 0,60.

  • Factor de reducción por otras condiciones de envejecimiento: γ_{age} = 0,10 (cortante); γ_{age} = 0,50 (tracción).

  • Factor de reducción por adherencia efectiva (véase la ec.4): γ_1 = 1,0.

- Panel HPL:

  • Espesor: t_{clad} = 10 mm.

  • Densidad: ρ_{clad} = 1500 kg/m^3.

  • Estabilidad dimensional por humedad: VD_h = VD_v = 0,25% = 2,5 mm/m.

  • Se desprecian los movimientos por temperatura del panel: α_{clad} = 0.

• Temperatura del panel en la aplicación del adhesivo:
$T_{0,clad}$ = 10 °C (dato apdo. 3.4.2 DB SE-AE CTE)

• Temperatura del panel en servicio:
$T_{1,clad}$ = 76 °C = 46 °C (dato para Zona 4, apdo. 3.4.2 DB SE-AE CTE) + 30 °C (dato de incremento debido a radiación solar en orientación sur con panel claro, apdo. 3.4.2 DB SE-AE CTE).

- Perfil de aluminio:

• Coeficiente de dilatación térmica: α_p = 23 µm/(m·°C)

• Temperatura del perfil en la aplicación del adhesivo:
$T_{0,p}$ = 10 °C (dato apdo. 3.4.2 DB SE-AE CTE)

• Temperatura del perfil en servicio: $T_{1,p}$ = 46 °C (dato para Zona 4, apdo. 3.4.2 DB SE-AE CTE). No se considera dato de radiación por estar en la cámara y por tanto en sombra.

Otros datos del sistema:

- Se desprecian los movimientos por temperatura del muro soporte: α_w = 0.

- Acción del viento: Q_e = 2,5 kN/m² (dato estimado para condiciones muy expuestas).

Barcelona, 1 de julio de 2020

A.1.2. Límite dimensional del panel condicionado por las variaciones de humedad y temperatura

(ec.11a) $\Delta L_{v,T^a} = (0 \times (76-10) - 23 \cdot 10^{-6} \times (46-10)) \times H_{clad}/2 = 4{,}14 \cdot 10^{-4} \times H_{clad}$ [mm]

(ec.11b) $\Delta L_{h,T^a} = (0 \times (76-10) - 0) \times L_{clad}/2 = 0 \times L_{clad}$ [mm]

(ec.15a) $\Delta L_{v,HR} = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \times H_{clad}/2 = 1{,}25 \cdot 10^{-3} \times H_{clad}$ [mm]

(ec.15b) $\Delta L_{h,HR} = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \times L_{clad}/2 = 1{,}25 \cdot 10^{-3} \times L_{clad}$ [mm]

(ec.10a) $\Delta L_v = | 4{,}14 \cdot 10^{-4} \times H_{clad} - 1{,}25 \cdot 10^{-3} \times H_{clad} | = 8{,}36 \cdot 10^{-4} \times H_{clad}$ [mm]

Se utiliza el signo negativo porque se considera que ambos movimientos son de expansión.

(ec.10b) $\Delta L_h = | 0 + 1{,}25 \cdot 10^{-3} \times L_{clad} | = 1{,}25 \cdot 10^{-3} \times L_{clad}$ [mm]

Calc-01: Considerando combinación de movimientos (ec.9a) y suponiendo que

$\Delta L_v = \Delta L_h \leq d_s / \sqrt{2} = \sqrt{((t + \Delta L_{t,des})^2 - t^2)}/\sqrt{2}$; por tanto:

$\sqrt{((3{,}0 + 1{,}0)^2 - 3{,}0^2)} / \sqrt{2} \geq 8{,}36 \cdot 10^{-4} \times H_{clad}$; **$H_{clad} \leq 2237$ mm**

$\sqrt{((3{,}0 + 1{,}0)^2 - 3{,}0^2)} / \sqrt{2} \geq 1{,}250 \cdot 10^{-3} \times L_{clad}$; **$L_{clad} \leq 1496$ mm**

Calc-02: Considerando que no hay combinación de movimientos:

$\sqrt{((3{,}0 + 1{,}0)^2 - 3{,}0^2)} \geq 8{,}36 \cdot 10^{-4} \times H_{clad}$; **$H_{clad} \leq 3164$ mm**

$\sqrt{((3{,}0 + 1{,}0)^2 - 3{,}0^2)} \geq 1{,}250 \cdot 10^{-3} \times L_{clad}$; **$L_{clad} \leq 2116$ mm**

Barcelona, 1 de julio de 2020

A.1.3. Acción de peso propio

$Q_{pp} = \rho_{clad} \times t_{clad} = 1500\ kg/m^3 \times 10\ mm = 15\ kg/m^2$

$\gamma_{pp} = 1{,}35$

$\gamma_{age} = 0{,}10$

(ec.4) $\gamma_1 = 1{,}0$

(ec.3) $\tau_{cal} = 0{,}12\ MPa \times 0{,}60 \times 0{,}10 = 0{,}0072\ MPa$

Sistema con dos perfiles verticales por panel:

$N_b = 4$

<u>Calc-01:</u> Considerando $L_{clad} = 1496$ mm (dato límite por condiciones ambientales con combinación de movimientos)

(ec.2) $b_{cort} = (15\ kg/m^2 \times 1{,}35 \times 1496\ mm \times 10^{-5}) / (0{,}0072\ MPa \times 4 \times 1) = 10{,}52\ mm < 12\ mm = b_{min}$;
=> OK

<u>Calc-02:</u> Considerando $L_{clad} = 2116$ mm (dato límite por condiciones ambientales sin combinación de movimientos)

(ec.2) $b_{cort} = (15\ kg/m^2 \times 1{,}35 \times 2116\ mm \times 10^{-5}) / (0{,}0072\ MPa \times 4 \times 1) = 14{,}88\ mm > 12\ mm = b_{min}$;
=> no OK

<u>Calc-03:</u> Considerando $b_{cort} = b_{min} = 12$ mm

(ec.1) $L_{clad} \leq (0{,}0072\ MPa \times 12\ mm \times 4 \times 1 \times 10^5) / (15\ kg/m^2 \times 1{,}35) = 1706\ mm > 1496\ mm$ => OK
si se considera combinación de movimientos, los 12 mm de cordón permiten longitudes mayores que las limitantes por condiciones ambientales;

o bien < 2116 mm => no OK si no se considera combinación de movimientos en condiciones ambientales.

Por tanto, el límite estará en 1496 mm por combinación de movimientos o 1706 mm por ancho mínimo de cordón.

Sistema con tres perfiles verticales por panel:

N_b = 6 (dos cordones por perfil, incluidos los perfiles extremos)

Calc-01: Considerando L_{clad} = 1496 mm (dato límite por condiciones ambientales con combinación de movimientos)

(ec.2) b_{cort} = (15 kg/m² x 1,35 x 1496 mm x 10^{-5}) / (0,0072 MPa x 6 x 1) = 7,01 mm < 12 mm = b_{min}; => OK

Calc-02: Considerando L_{clad} = 2116 mm (dato límite por condiciones ambientales sin combinación de movimientos)

(ec.2) b_{cort} = (15 kg/m² x 1,35 x 2116 mm x 10^{-5}) / (0,0072 MPa x 6 x 1) = 9,91 mm < 12 mm = b_{min}; => OK

Calc-03: Considerando b_{cort} = b_{min} = 12 mm

(ec.1) L_{clad} ≤ (0,0072 MPa x 12 mm x 6 x 1 x 10^5) / (15 kg/m² x 1,35) =
= 2560 mm > 1496 mm o > 2116 mm; => OK, los 12 mm de cordón permiten longitudes mayores que las limitantes por condiciones ambientales.

A.1.4. Acción de succión de viento

Q_e = 2,5 kN/m² (dato estimado para una situación muy expuesta)

γ_Q = 1,50

γ_{age} = 0,50

(ec.4) γ_1 = 1,0

(ec.7) σ_{cal} = 0,15 MPa x 0,60 x 0,50 = 0,045 MPa

Sistema con dos perfiles verticales por panel:

K_{ext} = 0,50 (tabla 4.1)

l_{ext} = 20 mm

$n_{b\text{-}ext}$ = 2

Barcelona, 1 de julio de 2020

Calc-01: Considerando L_{clad} = 1496 mm (dato límite por condiciones ambientales con combinación de movimientos)

$l_p = L_{clad} - 2 \times l_{ext}$ = 1456 mm

(ec.6a) b_{tens} = (2,5 kN/m² x 1,50 x (0,50 x 1456 mm + 20) x 10^{-3}) / (0,045 MPa x 2 x 1) =
= 31,2 mm > 12 mm = b_{min}; => no OK -> **redefinir b_{min} = 32 mm**

Calc-02: Considerando L_{clad} = 2116 mm (dato límite por condiciones ambientales sin combinación de movimientos)

$l_p = L_{clad} - 2 \times l_{ext}$ = 2076 mm

(ec.6a) b_{tens} = (2,5 kN/m² x 1,50 x (0,50 x 2076 mm + 20) x 10^{-3}) / (0,045 MPa x 2 x 1) =
= 44,01 mm > 12 mm = b_{min}; => no OK -> **redefinir b_{min} = 45 mm**

Calc-03a: Considerando b_{tens} = b_{min} = 12 mm

(ec.5a) $L_{clad} = l_p + 2 \times l_{ext} \leq$ ((0,045 MPa x 12 mm x 2 x 1 x 10^3) / (2,5 kN/m² x 1,50) – 20) / 0,50 +
+ 2 x 20= 576 mm < 1496 mm o << 2116 mm => no OK;

Calc-03b: Considerando b_{tens} = b_{min} = 32 mm

(ec.5a) $L_{clad} = l_p + 2 \times l_{ext} \leq$ ((0,045 MPa x 32 mm x 2 x 1 x 10^3) / (2,5 kN/m² x 1,50) – 20) / 0,50 + 2 x
x 20 = 1536 mm > 1496 mm => OK; sin embargo < 2116 mm => no OK en estas condiciones.

Calc-03c: Considerando b_{tens} = b_{min} = 45 mm

(ec.5a) $L_{clad} = l_p + 2 \times l_{ext} \leq$ ((0,045 MPa x 45 mm x 2 x 1 x 10^3) / (2,5 kN/m² x 1,50) – 20) / 0,50 + 2 x
x 20 = 2160 mm > 1496 mm => OK; y también > 2116 mm => OK.

Calc-04: Considerando b_{min} = b_{tens} = 12 mm, obtención de la longitud máxima entre perfiles (l_p).

(ec.5a) $l_p \leq$((0,045 MPa x 12 mm x 2 x 1 x 10^3) / (2,5 kN/m² x 1,50) - 20) / 0,50 = 536 mm

Barcelona, 1 de julio de 2020

Sistema con tres perfiles verticales por panel:

K_{ext} = 0,375 (tabla 4.1)

K_{int} = 1,25 (tabla 4.1)

l_{ext} = 20 mm

$n_{b\text{-}ext}$ = 1

$n_{b\text{-}int}$ = 2

Calc-01: Considerando L_{clad} = 1496 mm (dato límite por condiciones ambientales con combinación de movimientos)

$l_p = (L_{clad} - 2 \times l_{ext})/2 = (1496 - 2 \times 20) / 2 = 728$ mm

(ec.6a) $b_{tens)ext} = (2{,}5\ kN/m^2 \times 1{,}50 \times (0{,}375 \times 728\ mm + 20) \times 10^{-3}) / (0{,}045\ MPa \times 1 \times 1) =$
$= 24{,}4\ mm > 12\ mm = b_{min};$ => no OK **-> redefinir b_{min} = 25 mm**

(ec.6b) $b_{tens)int} = (2{,}5\ kN/m^2 \times 1{,}50 \times 1{,}25 \times 728\ mm \times 10^{-3}) / (0{,}045\ MPa \times 2 \times 1) =$
$= 39{,}92\ mm > 12\ mm = b_{min}$; => no OK **-> redefinir b_{min} =40mm**

(ec.6c) b_{tens} = 40 mm

Calc-02: Considerando L_{clad} = 2116 mm (dato límite por condiciones ambientales sin combinación de movimientos)

$l_p = (L_{clad} - 2 \times l_{ext})/2 = (2116 - 2 \times 20)/2 = 1038$ mm

(ec.6a) $b_{tens)ext} = (2{,}5\ kN/m^2 \times 1{,}50 \times (0{,}375 \times 1038\ mm + 20) \times 10^{-3}) / (0{,}045\ MPa \times 1 \times 1) =$
$= 34{,}1\ mm > 12\ mm = b_{min};$ => no OK **-> redefinir b_{min} =35mm**

(ec.6b) $b_{tens)int} = (2{,}5\ kN/m^2 \times 1{,}50 \times 1{,}25 \times 1038\ mm \times 10^{-3}) / (0{,}045\ MPa \times 2 \times 1) = 54{,}1\ mm >$
$> 12\ mm = b_{min};$ => no OK **-> redefinir b_{min} = 55 mm**

(ec.6c) b_{tens} = 55 mm

Barcelona, 1 de julio de 2020

Calc-03a: Considerando $b_{min} = b_{tens} = 40$ mm

(ec.5a) $L_{clad} = 2 \times l_p + 2 \times l_{ext} \leq 2 \times (((0{,}045 \text{ MPa} \times 40 \text{ mm} \times 1 \times 1 \times 10^3) / (2{,}5 \text{ kN/m}^2 \times 1{,}50) - 20) / 0{,}375) + 2 \times 20 = 1616 \text{ mm} > 1496 \text{ mm}$; => OK

(ec.5b) $L_{clad} = 2 \times l_p + 2 \times l_{ext} \leq 2 \times ((0{,}045 \text{ MPa} \times 40 \text{ mm} \times 2 \times 1 \times 10^3) / (2{,}5 \text{ kN/m}^2 \times 1{,}50 \times 1{,}25)) + 2 \times 20 = 1576 \text{ mm} > 1496 \text{ mm}$ => OK;

Calc-03b: Considerando $b_{min} = b_{tens} = 55$ mm

(ec.5a) $L_{clad} = 2 \times l_p + 2 \times l_{ext} \leq 2 \times (((0{,}045 \text{ MPa} \times 55 \text{ mm} \times 1 \times 1 \times 10^3) / (2{,}5 \text{ kN/m}^2 \times 1{,}50) - 20) / 0{,}375) + 2 \times 20 = 2192 \text{ mm} > 2116 \text{ mm}$; => OK

(ec.5b) $L_{clad} = 2 \times l_p + 2 \times l_{ext} \leq 2 \times ((0{,}045 \text{ MPa} \times 55 \text{ mm} \times 2 \times 1 \times 10^3) / (2{,}5 \text{ kN/m}^2 \times 1{,}50 \times 1{,}25)) + 2 \times 20 = 2152 \text{ mm} > 2116 \text{ mm}$ => OK;

Calc-04: Considerando $b_{min} = b_{tens} = 12$ mm, obtención de la longitud máxima entre perfiles (l_p).

(ec.5a) $l_p \leq ((0{,}045 \text{ MPa} \times 12 \text{ mm} \times 1 \times 1 \times 10^3) / (2{,}5 \text{ kN/m}^2 \times 1{,}50) - 20) / 0{,}375 = 330 \text{ mm}$

(ec.5b) $l_p \leq (0{,}045 \text{ MPa} \times 12 \text{ mm} \times 2 \times 1 \times 10^3) / (2{,}5 \text{ kN/m}^2 \times 1{,}50 \times 1{,}25) = 230 \text{ mm}$

Barcelona, 1 de julio de 2020

A.1.5. Comprobación para combinación de la acción de peso y viento

Sistema con dos perfiles verticales por panel:

Calc-01: Considerando L_{clad} = 1496 mm (dato límite por condiciones ambientales con combinación de movimientos)

(ec.8) $b_{total} = \sqrt{((10{,}52\ mm)^2 + (31{,}2\ mm)^2)} = 32{,}92\ mm > 32\ mm = b_{min}$ **-> redefinir b_{min} = 33 mm**

Calc-02: Considerando L_{clad} = 2116 mm (dato límite por condiciones ambientales sin combinación de movimientos)

(ec.8) $b_{total} = \sqrt{((14{,}88\ mm)^2 + (44{,}01\ mm)^2)} = 46{,}46\ mm > 45\ mm = b_{min}$ **-> redefinir b_{min} = 47 mm**

Sistema con tres perfiles verticales por panel:

Calc-01: Considerando L_{clad} = 1496 mm (dato límite por condiciones ambientales con combinación de movimientos)

(ec.8) $b_{total} = \sqrt{((7{,}01\ mm)^2 + (39{,}92\ mm)^2)} = 40{,}5\ mm < 35\ mm = b_{min}$ **-> redefinir b_{min} = 41 mm**

Calc-02: Considerando L_{clad} = 2116 mm (dato límite por condiciones ambientales sin combinación de movimientos)

(ec.8) $b_{total} = \sqrt{((9{,}91\ mm)^2 + (54{,}1\ mm)^2)} = 55\ mm$; **-> OK redefinición b_{min} = 55 mm**

Barcelona, 1 de julio de 2020

A.1.6. Diseño final

El diseño final del sistema de fijación adhesiva del panel en las condiciones calculadas es:
Panel de dimensiones máximas considerando combinación de movimientos:

H_{clad} ≤ 2237 mm
L_{clad} ≤ 1496 mm

Cordones de adhesivo de dimensiones mínimas:

b_{min} = 33 mm si dos perfiles verticales
b_{min} = 41 mm si tres perfiles verticales

Panel de dimensiones máximas NO considerando combinación de movimientos:

H_{clad} ≤ 3164 mm
L_{clad} ≤ 2116 mm

Cordones de adhesivo de dimensiones mínimas:

b_{min} = 47 mm si dos perfiles verticales
b_{min} = 55 mm si tres perfiles verticales

En el caso de cordones de 12 mm, la separación máxima entre perfiles será:

l_p ≤ 536 mm si dos perfiles verticales
l_p ≤ 230 mm si tres perfiles verticales

Barcelona, 19 de mayo de 2020

Anexo 2 – Justificación técnica para la ecuación (ec.9c) – Método 2

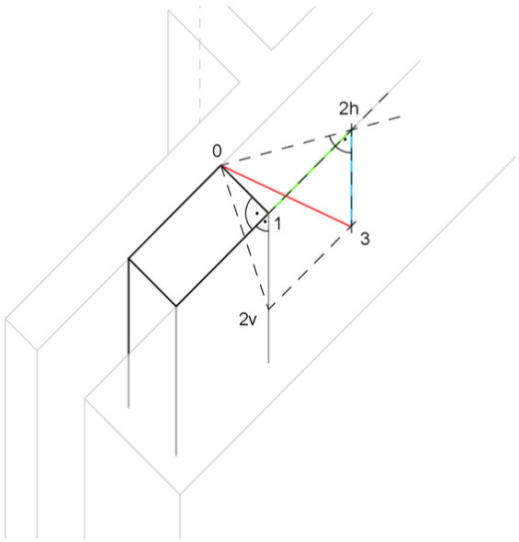
El desplazamiento del adhesivo (d_s) por movimientos de los paneles y perfiles debidos a las variaciones de temperatura y humedad puede determinarse como sigue, partiendo de la base de que el fabricante del adhesivo ha definido el valor de diseño $\Delta L_{t,des}$ a partir del ensayo de resistencia a tracción.

$d_s^2 = (t + \Delta L_{t,des})^2 - t^2$

donde:

- d_s (en mm) = desplazamiento absoluto del adhesivo.
- $\Delta L_{t,des}$ (en mm) = valor de diseño del desplazamiento definido por el fabricante, a partir de pruebas de tracción del adhesivo.
- t (en mm) = espesor del cordón de adhesivo.

Tal como se muestra en la figura A2.1, si consideramos que la distancia $t = d_{0-1}$ inicial pasa a d_{0-3} final, las ecuaciones son:



$d_{0-3}^2 = d_{2h-3}^2 + d_{0-2h}^2 \rightarrow d_{0-2h}^2 = d_{0-3}^2 - d_{2h-3}^2$
$d_{0-2h}^2 = d_{0-1}^2 + d_{1-2h}^2 \rightarrow d_{1-2h}^2 = d_{0-2h}^2 - d_{0-1}^2$
$d_{1-2h}^2 = d_{0-3}^2 - d_{2h-3}^2 - d_{0-1}^2$
$d_{1-2h}^2 + d_{2h-3}^2 = d_{0-3}^2 - d_{0-1}^2$
$d_{0-3} = d_{0-1} + \Delta L_{t,des}$ ($\Delta L_{t,des}$ = lo que se alarga)
$d_{1-2h}^2 + d_{2h-3}^2 = (d_{0-1} + \Delta L_{t,des})^2 - d_{0-1}^2$
$d_{1-2h} = d_h$; $d^{2h-3} = d_v$
$d_s^2 = d_h^2 + d_v^2 = d_{1-2h}^2 + d_{2h-3}^2$
$d_s^2 = d_h^2 + d_v^2 = (d_{0-1} + \Delta L_{t,des})^2 - d_{0-1}^2$
$d_{0-1} = t$
$d_s^2 = d_h^2 + d_v^2 = (t + \Delta L_{t,des})^2 - t^2$

Figura A2.1: Justificación por trigonometría.

Los datos que se obtienen a partir de este Método 2 son equivalentes a los resultados que se obtienen a partir del Método 1 (a partir de ensayo de cortante, véase el apartado 4.4).

Barcelona, 19 de mayo de 2020

**Instituto de
Tecnología de la Construcción
de Cataluña**

Wellington 19
ES08018 Barcelona
T +34 933 09 34 04
qualprod@itec.cat
itec.es

© ITeC, julio de 2020