

## **EL APLACADO DE PIEDRA TRASVENTILADO. COMPORTAMIENTO MECÁNICO, CONDICIONANTES CONSTRUCTIVOS Y FORMALES, SU DURABILIDAD Y LESIONES**

Pérez Carramiñana, C., Mateo García, M., Piedecausa García, B.

*Escuela de Arquitectura de la Universidad de Alicante, Campus San Vicente del Raspeig, Ap. 99. E-03080, San Vicente del Raspeig (Alicante), España, c.perez@ua.es*

### **Abstract**

La evolución en el uso de los materiales pétreos y sistemas constructivos de fachada ventilada influye y condiciona el concepto del diseño de los cerramientos de fachada de los edificios y del proyecto arquitectónico. El objetivo de esta comunicación es identificar, analizar y valorar de forma sintética los principales condicionantes técnicos que deben considerarse en los aspectos constructivos que influyen en el proyecto de fachadas ventiladas de aplacado pétreo, interpretando sus prestaciones y su comportamiento mecánico.

Para garantizar su calidad y durabilidad, se propone la aplicación práctica de métodos de cálculo y control de calidad tanto de los materiales pétreos como del sistema constructivo.

La metodología empleada se basa tanto en ensayos en laboratorio de la piedra empleada como ensayos in situ del sistema constructivo ya ejecutado en obra, analizando las características físicas y comportamiento mecánico del aplacado en relación con las acciones a las que se ve sometido en un edificio.

Los resultados obtenidos permiten verificar las elevadas tensiones y sollicitaciones a las que se ven sometidos los aplacados pétreos trasventilados, y la importancia del adecuado proyecto y ejecución del cerramiento, mediante un correcto dimensionado y control de calidad de la obra.

En conclusión, la fachada trasventilada pétreo supone la transformación del tradicional carácter masivo del uso de la piedra natural en arquitectura en una delgada piel expuesta a sus máximas prestaciones dentro de un conjunto de capas especializadas funcionalmente. Por ello, entender mejor y de forma sintética el específico comportamiento mecánico del aplacado pétreo y sus sistemas de anclaje en las fachadas ventiladas, sus principales causas de lesión, las características constructivas más destacables y las metodologías de cálculo y ensayo para garantizar su durabilidad, contribuirá a mejorar la calidad constructiva de las fachadas ventiladas, manteniendo y potenciando el uso de la piedra natural en la arquitectura moderna.

**Keywords: aplacado de piedra trasventilado, comportamiento mecánico, dimensionado, lesiones, ensayos.**

### **1. Introducción**

El tradicional uso de la piedra en arquitectura por su carácter masivo como elemento constructivo autónomo que hacía de cerramiento y estructura a la vez, ha devenido en un material de revestimiento que, en el caso de las fachadas ventiladas, se configura como una hoja flotante dentro de un sub-sistema constructivo.

Esa evolución en el uso de los materiales pétreos y sistemas constructivos de fachada ventilada supone una transformación radical del concepto de cerramiento pétreo que condiciona el diseño y ejecución de los cerramientos de fachada de los edificios, y que debe ser considerado desde el proyecto para evitar ideas arquitectónicas muy preconcebidas a las que posteriormente hay que

ofrecer soluciones técnicas demasiado complejas, o errores en el dimensionado de proyecto o en la ejecución material, generadores de deficiencias constructivas.

El objetivo de esta comunicación es identificar, analizar y valorar de forma sintética los principales condicionantes técnicos que deben considerarse en los aspectos constructivos que influyen en el proyecto de fachadas ventiladas de aplacado pétreo, interpretando las específicas características de sus prestaciones y su especial comportamiento mecánico.

Cabe tener en cuenta que por sus características geométricas en forma de delgadas placas y su disposición constructiva configurando una hoja independiente, el aplacado pétreo trasventilado

se diferencia del tradicional muro de piedra o del aplacado adherido por experimentar nuevas y mayores sollicitaciones y esfuerzos, así como el aprovechamiento máximo del material por su escaso espesor, viéndose sometido a requerimientos excesivos en cuanto a sus prestaciones mecánicas.

Estas características propias del aplacado pétreo trasventilado supone nuevos condicionantes constructivos y formales cuyos principales factores a tener en cuenta vamos a proceder a analizar y valorar de forma sintética:

- El soporte debe ser una subestructura capaz de transmitir a la estructura del edificio las cargas que inciden sobre el revestimiento, y que pueden ser muros de hormigón, fábricas de ladrillo cerámico macizo o perforado, fábrica de bloques de hormigón o subestructuras auxiliares metálicas. La fábrica de ladrillo hueco no ofrece un soporte suficientemente homogéneo y resistente para las elevadas tensiones transmitidas por los anclajes, por lo que su uso como soporte de fachadas trasventiladas se debería considerar inaceptable.

- Los anclajes deben poder compatibilizar las deformaciones diferenciales y tolerancias dimensionales de ejecución entre el revestimiento pétreo y el soporte. Para ello deben permitir la regulación de distancia y los movimientos diferenciales entre soporte y placa, absorbiendo las deformaciones reológicas y térmicas (contracciones-dilataciones). Pero también se debe exigir a los anclajes su durabilidad electroquímica frente a la corrosión, su resistencia y estabilidad frente a las acciones gravitatorias como el peso de las placas, y la acción del viento, impacto, sismo y fuego, y todo ello mediante sistemas de fijación económicos y con sencillez de puesta en obra. El dimensionado y elección del tipo de anclaje debe tener en cuenta no sólo las cargas a transmitir, sino las características resistentes del material del soporte al que las transmite.

- La cámara trasventilada evita la acción directa del sol sobre el resto del sistema (calor por radiación y por conducción), pero debe también evitar la transmisión del calor por convección y reducir el riesgo de condensaciones. Para ello resulta muy importante garantizar la correcta ventilación de la cámara evitando estrangulamientos y dimensionando las aberturas de ventilación mediante el suficiente porcentaje de huecos de entrada y salida de aire, sobre todo en la base y en la coronación de la fachada, para facilitar el flujo de ascensión del aire caliente y

reducir la presión de vapor dentro de la cámara. Igualmente, resulta fundamental garantizar el correcto drenaje inferior de la cámara facilitando la evacuación hacia el exterior de la posible agua condensada, de la que haya podido entrar procedente de precipitaciones o de la humedad absorbida por capilaridad por alguno de los materiales componentes del sistema constructivo.

- Las juntas del aplacado pétreo deben proyectarse no sólo en base a criterios formales, sino mediante una distribución que respete las juntas estructurales y de dilatación de la estructura del edificio, y un dimensionado que permita los movimientos de dilatación y contracción del revestimiento pétreo debido a los importantes cambios térmicos que experimenta, calculando el ancho de junta necesario considerando el coeficiente de dilatación de la piedra seleccionada y la distancia máxima entre juntas debido al tamaño de la placa.

La falta de consideración de los aspectos anteriormente expuestos está detrás de la mayoría de las lesiones que se detectan en las fachadas pétreas trasventiladas. Lesiones que podemos resumir principalmente en el siguiente listado:

- Rotura de las placas pétreas por esfuerzos de flexión debidos a las presiones y succiones producidas por la acción de viento, a impactos o a la coacción de movimientos de origen térmico del revestimiento o del soporte.

- Rotura de las placas pétreas por arrancamiento entre el anclaje y el aplacado en los puntos de fijación igualmente por acción del viento, impactos, esfuerzos de origen térmico o la acción sísmica.

- Desprendimiento del aplacado por arrancamiento entre anclaje y soporte por exceso de carga debido al insuficiente número y distribución propuesta de los anclajes (excesivo dimensionado de las placas o de la distancia entre anclajes) o deficiente resistencia del soporte para las cargas transmitidas por el anclaje.

Igualmente, el delgado espesor del aplacado pétreo en una fachada ventilada incrementa la importancia de los factores que afectan a la durabilidad del revestimiento de piedra, tanto los factores intrínsecos (propiedades físico-químicas de la piedra), como los factores ambientales (cambios térmicos, erosión por la acción del viento o acción del spray marino, entre otros), produciéndose lesiones que podemos resumir principalmente en el siguiente listado:

- Rotura en los anclajes debido a disminuciones de la sección resistente por presencia de coqueras o grietas internas que merman la resistencia de la placa de piedra.
- Rotura por esfuerzo cortante o de flexión por falta de homogeneidad de la piedra o insuficiente cohesión molecular.
- Transformaciones de carácter estético y resistente por presencia de sales ferrosas en ambientes agresivos.
- Fisuración por la acción hielo/deshielo por exceso de porosidad y falta de resistencia de la piedra ante la agresividad del ambiente.

Dado el evidente incremento de optimización del material pétreo que plantean las soluciones constructivas de fachada ventilada, resulta pertinente plantearse la necesidad de incorporar metodologías de cálculo para el correcto dimensionado de estos aplacados y sus sistemas de anclaje.

Con la finalidad de incrementar la precisión en el dimensionado del aplacado pétreo en proyecto, y el control de su ejecución material, se propone la aplicación práctica de métodos de cálculo y control de calidad tanto de los materiales pétreos como del sistema constructivo.

La metodología empleada se basa tanto en ensayos en laboratorio de la piedra seleccionada como ensayos in situ del sistema constructivo ya ejecutado en obra, analizando las características físicas y comportamiento mecánico del aplacado en relación con las acciones y exigencias a las que se ve sometido en un edificio.

Y si bien los métodos de cálculo a aplicar en fachadas ventiladas resultan sustancialmente más sencillos que los empleados para el dimensionado de estructuras metálicas o de hormigón armado, sí presentan peculiaridades y condicionantes específicos que procedemos a determinar mediante el trabajo experimental expuesto a continuación.

## 2. Materiales y método

### 2.1 General

Para el correcto dimensionado de una fachada trasventilada pétreo es necesario un diseño experimental y modelización que permita tanto la comprobación de la resistencia de las placas de piedra natural a flexión y a arrancamiento entre la piedra y el anclaje, como el cálculo de la resistencia a arrancamiento entre el anclaje y el soporte.

Con tal fin, se han realizado ensayos en laboratorio de la piedra empleada y ensayos in situ del sistema constructivo ya ejecutado en

obra, analizando las características físicas y comportamiento mecánico del aplacado en relación con las acciones y exigencias a las que se ve sometido en la realidad una vez ejecutada la fachada del edificio. Para ello, por una parte se ensayaron en laboratorio las placas de piedra a flexión y se realizaron modelos de rotura de la piedra con anclaje puntual de bulón. Por otra, se realizaron in situ ensayos de arrancamiento entre los anclajes y el soporte en el edificio construido.

### 2.2 Materiales y equipamiento

En los ensayos en laboratorio se utilizaron placas de piedra natural de las mismas dimensiones y peso específico que las empleadas en la fachada analizada.

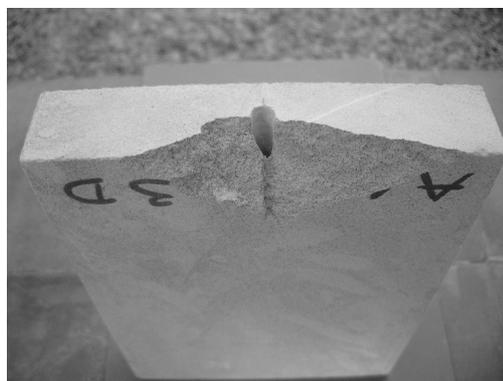


Figura 1: Ensayo de arrancamiento anclaje-placa.

Las pruebas in situ se realizaron mediante ensayos de arrancamiento anclaje-soporte “pull-out”, con émbolo de presión y bomba hidráulica “Enerpac”, aplicado sobre el anclaje a ensayar.



Figura 1: Ensayo de arrancamiento anclaje-soporte.

Las acciones consideradas sobre el aplacado pétreo están basadas en la altura de coronación de la fachada del edificio, en la zona eólica donde se ubica el edificio y su tipo de exposición conforme a la normativa, así como el grado de

intensidad para las acciones sísmicas y el coeficiente sísmico básico correspondiente a la población., conforme al DB SE-AE, la NTE-ECV y la norma sísmica PDS-1/1974 por considerarse más adecuada su aplicación a estos efectos que la normativa actual (Vera, R, 2003).

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos muestran las elevadas tensiones y sollicitaciones a las que se ven sometidas las placas de piedra natural y los anclajes considerando las acciones que actúan sobre dichos elementos constructivos cuando forman parte de la fachada trasventilada, llegando a superar las tensiones de rotura, lo que explica que se produzca el desprendimiento del aplacado.

Tabla 1: Resultados de ensayos y cálculos.

Estudio de rotura	Resultados ensayos	Cargas y tensiones calculadas	
rotura del aplacado	(en laboratorio) arrancamiento aplacado-anclaje Qadm1=42,78 Kp (valor medio) Qadm2=31,94 Kp (valor mínimo)	Fh viento Fh's =30,38 Kp <Qadm2<Qadm1	cumple
		Fh sismo Fh's =3,50 Kp <Qadm2<Qadm1	cumple
	(ensayo a flexo-tracción en laboratorio) σ adm=1,31 Mpa	flexión por viento σ máx = 0,25 Mpa < σ adm	cumple
		flexión por sismo σ máx = 0,058 Mpa < σ adm	cumple
rotura anclaje - soporte	(ensayo in situ) arrancamiento anclaje-soporte Qadm1=44,83 Kp (valor medio) Qadm2=26,89 Kp (valor mínimo)	Fh viento Fh's =30,38Kp <Qadm1 >Qadm2	NO cumple
		Fh sismo Fh's =3,50 Kp <Qadm2<Qadm1	cumple

Cabe destacar especialmente las elevadas tensiones producidas por el efecto de succión del viento en las zonas del cerramiento próximas a las esquinas de los paramentos perpendiculares a las fachadas más expuestas al viento. Los datos obtenidos muestran que el desprendimiento del aplacado se llega a producir en muchas ocasiones por insuficiente resistencia a arrancamiento entre el anclaje y el soporte, y no por la rotura de la piedra. Los cálculos realizados también muestran que la acción del viento sobre un aplacado trasventilado pétreo resulta mucho más dañina que la acción sísmica, lo que resulta lógico dada la gran superficie de revestimiento expuesto a la acción horizontal del viento frente al relativamente escaso peso e inercia del

aplacado como elemento constructivo sometido al movimiento sísmico.

Por otra parte, hay que reseñar que los resultados obtenidos en los ensayos reflejan la gran variación en los valores de rotura en función de la naturaleza de la piedra, del soporte y del tipo de anclaje, obligando a establecer coeficientes de seguridad mucho más elevados que los utilizados en el cálculo estructural de hormigón armado o acero. En igual sentido se expresan normativas como la ASTM C 1242-96 b o los métodos de cálculo semiprobabilísticos de la UNI 32045130, que plantea dos hipótesis de coeficientes de seguridad a emplear en función del grado de conocimiento del aplacado obtenido mediante planes de ensayo previos.

Igualmente, la modelización que permite el cálculo de la resistencia de los anclajes de una fachada ventilada pétreo presenta importantes problemas para establecer rigurosamente las hipótesis de comportamiento debido a la gran variedad de tamaños de placas utilizados según el diseño de la fachada, alteraciones de la distancia entre anclajes según el replanteo, o los diferentes espesores de piedra empleados o el tamaño de las perforaciones realizadas in situ.

El coste y la dificultad de realizar un número suficientemente amplio de ensayos de rotura de la piedra empleada en cada edificio ejecutado, y de los ensayos de arrancamiento "pull-out" in situ, así como la elevada variabilidad de los resultados obtenidos debido al carácter natural del material pétreo, hace necesario asimismo incrementar los coeficientes de seguridad destinados a absorber el riesgo de incidencias tales como: variaciones de las cargas y sollicitaciones o variaciones de la resistencia del material debido a su heterogeneidad, a modificaciones de las secciones resistentes del aplacado empleado en obra, a alteraciones físico-químicas en el tiempo, o a otras deficiencias en la ejecución material de la obra.

De las características del comportamiento mecánico de los aplacados trasventilados, de la modelización y ensayos realizados, y de los resultados obtenidos, se puede deducir:

- La necesidad de elegir en proyecto el tipo de piedra a emplear en función no sólo de factores estéticos, sino de su resistencia mecánica a arrancamiento, a flexión y a impacto, y por tanto, también de su homogeneidad y ausencia de fisuras o coqueras, de su resistencia a cambios de humedad y heladicidad, su riesgo de exfoliación o su contenido de sales ferrosas.

- La conveniencia de evaluar el comportamiento mecánico de la unión soporte-anclaje y anclaje-aplacado en función de las sollicitaciones esperadas, con el fin de realizar un correcto dimensionado del espesor del aplacado, las distancias entre anclajes y el tipo de anclaje.
- La necesidad de reducir posibles deficiencias de ejecución material mediante la resolución y definición en proyecto de la disposición y distribución de los anclajes al soporte y a las placas, así como la realización de las perforaciones de los cantos de las placas en taller o en obra mediante plantillas de perforación.
- La necesidad de incrementar el control de calidad de la obra ejecutada mediante ensayos en laboratorio de las características físico-químicas de la piedra empleada, y ensayos in situ de arrancamiento pull-out del sistema de anclaje.

#### 4. Conclusión

En la fachada trasventilada pétreo actual, el tradicional carácter masivo del uso de la piedra natural en arquitectura se ha transformado en una delgada piel expuesta a sus máximas prestaciones dentro de un conjunto de capas especializadas funcionalmente. Las diferencias de comportamiento mecánico del aplacado pétreo y sus sistemas de anclaje en las fachadas ventiladas respecto del aplacado adherido hacen pertinente el dominio de sus características

constructivas más importantes y de las metodologías de cálculo y ensayo necesarias para garantizar la calidad constructiva y su durabilidad.

#### Referencias

- Vera, R, (2003). Temas de construcción 2. Fachadas de edificios con aplacado de piedra transventilado. Imprenta Gamma, España, 85-90.
- ASTM C 1242-96 b, (1996). American Society for Testing and Material, E.E.U.U.
- UNI 32045130. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- NTE-ECV, (1988). Ed. Ministerio de Fomento, España.
- DB-SE-AE, (2006). Ed. Ministerio de la Presidencia. Boletín Oficial del Estado, España.
- PDS-1/1974, (1974). Ed. Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, España.