

Diseño, cálculo y ejecución de fachadas de piedra natural en el museo Louvre de Abu Dhabi

Design, calculation and realization of natural stone cladding façades for Louvre museum in Abu Dhabi

Iñaki Auzmendi Alfaro^{*, a}, Arturo Ruiz de Villa Valdés^b

^a Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Jefe de Proyecto, inaki.auzmendi@ar2v.com

^b Ingeniero de Caminos, AR2V Ingeniería, Director General, arturo.ruizdevilla@ar2v.com

RESUMEN

Dentro del nuevo museo del Louvre de Abu Dhabi, se encuentran tres fachadas de piedra natural (mármol y caliza) con textos grabados diseñadas por la artista estadounidense Jenny Holzer. La materialización de esta idea trajo consigo el reto técnico de diseñar un sistema que reuniese a la vez la capacidad de soportar las cargas a las que se verá sometido y la libertad de ajuste de las piezas durante el montaje para lograr un buen acabado. En este artículo se explica el proceso completo desde la concepción del sistema de cuelgue hasta su validación mediante ensayos y su instalación final en el museo.

ABSTRACT

Inside the new Louvre museum in Abu Dhabi, there are three façades of natural stone (marble and limestone) with engraved texts designed by the American artist Jenny Holzer. The materialization of this idea brought with it the technical challenge of designing a system that combines both the ability to withstand the loads to which it will be subjected and the freedom of adjustment of the pieces during assembly to achieve a good finish. In this work, the complete process from the conception of the hanging system until its validation through tests and its final installation in the museum is presented.

PALABRAS CLAVE: fachada, edificación, piedra, acero, escultura, ensayo, Abu Dhabi, Louvre, mármol, caliza.

KEYWORDS: façade, building, natural stone, steel, sculpture, test, Abu Dhabi, Louvre, marble, limestone.

1. Introducción

El origen del museo Louvre de Abu Dhabi se remonta al año 2007, cuando Francia y los Emiratos Árabes Unidos llegaron a un acuerdo para crear una institución cultural que permitiese combinar el diseño francés con la herencia árabe.

El resultado de ello es un espectacular museo diseñado por el estudio de Jean Nouvel y calculado por la ingeniería de Buro Happold que, bajo su cúpula de acero inoxidable y 180 m de diámetro (Figura 1), alberga obras que permiten

recorrer la historia del arte desde sus orígenes hasta hoy día.

Para las fachadas de tres de las salas, la artista norteamericana Jenny Holzer ha concebido obras que consisten en textos grabados en piedra natural. Estos textos están escritos en sánscrito, árabe y francés y pertenecen a las tablas sumerias sobre el mito de la creación, el Muqaddimah de Ibn Khaldun y los ensayos de Michel de Montaigne respectivamente.



Figura 1. Cúpula del museo Louvre de Abu Dhabi .

La fachada de mármol se encuentra en el vestíbulo principal y las dos fachadas de caliza se localizan en zonas más externas sobre sendos estanques. Esta localización influye, en la consideración de los factores de seguridad a considerar en el cálculo, dada las diferentes Clases de Consecuencias de cada zona. A continuación se muestra la localización en el museo de las tres fachadas (Figura 2) y su aspecto (Figuras 3, 4 y 5).

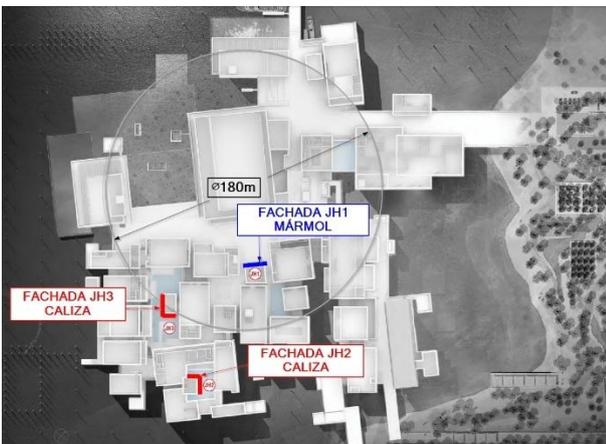


Figura 2. Localización de las fachadas.

La fachada de mármol (JH1) presenta unas dimensiones de 13.37 m x 7.3 m (Ancho x Alto) con paneles tipo de 1906 mm x 1067 mm y un espesor de 100 mm. (Figura 3).

Las fachadas de caliza (JH2 y JH3) presentan una planta en forma de L, en la que sus muros principales están grabados y tienen unas dimensiones de 11.6 m x 11.2 m y (Ancho x Alto) y 14.33 m x 7.53 m respectivamente. Sus muros secundarios miden 11.6 m x 7.13 m y 9.22

m x 7.53 m y sólo está grabado el paño secundario de la pared JH3.

Las dimensiones de los paneles son de aproximadamente 1.9 x 1.0 m y 100 mm de espesor en la pared de mármol y de hasta 2.0 x 1.0 m en las paredes de caliza, con un espesor de 70 mm para estas últimas. (Figuras 4 y 5).



Figura 3. Fachada JH1 con texto en escritura cuneiforme grabado en mármol.

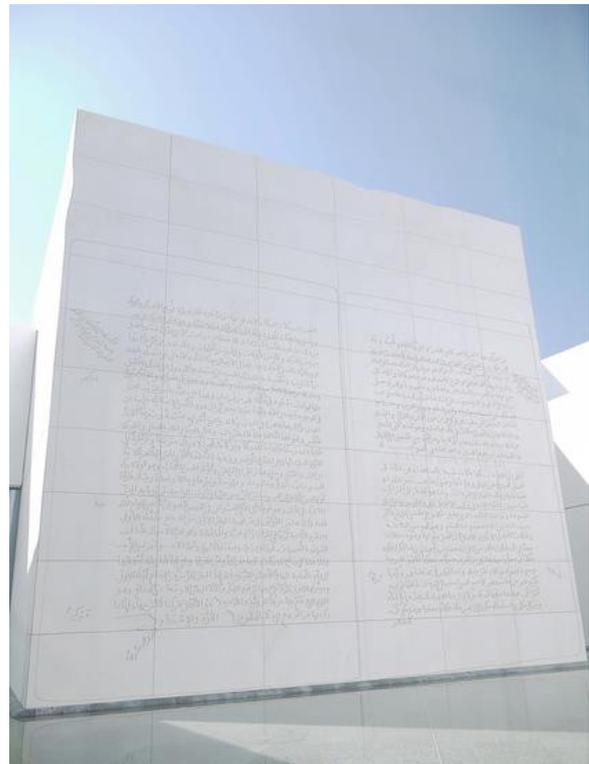


Figura 4. Fachada JH2 con texto en árabe grabado en caliza.



Figura 5. Fachada JH3 con texto en francés grabado en caliza.

2. Bases de Cálculo y condicionantes

El cálculo de una escultura presenta a menudo particularidades que tienen que ver con la estética de la obra e introducen al proyecto unas condiciones de contorno que en otros casos no se contemplarían. En el presente trabajo estos condicionantes fueron el peso propio de las piezas, asociado al espesor del panel necesario para dotar de profundidad a las letras y el deseo de minimizar al máximo la apertura de las juntas entre paneles.

A continuación se indican los puntos principales considerados en las bases de cálculo de este proyecto y para cuyo cumplimiento se desarrolló el sistema mostrado en este artículo.

2.1 Materiales

El rasgo más característico de estas obras es el material utilizado para su fabricación. La piedra natural se ha utilizado desde los primeros vestigios del arte para transmitir las ideas del artista y en esta obra se ha usado como el lienzo en el que escribir el texto de un mensaje.

Desde el punto de vista de su cálculo, es necesario conocer y considerar adecuadamente la naturaleza propia de este material. La piedra, debido a su proceso de formación, presenta una serie de discontinuidades internas desconocidas a priori y que necesitan de coeficientes de seguridad adicionales, de los que materiales con

un proceso de fabricación más controlado (como el acero o el hormigón) pueden prescindir.

Las características mecánicas de las piedras utilizadas son las que siguen:

Tabla 1. Características mecánicas del mármol.

Características	Norma de ensayo	Valores
Denominación	UNE-EN 12407	Mármol calcítico
Densidad aparente	UNE-EN 1936	2710 kg/m ³
Resistencia flexión carga concentrada	UNE-EN 12372	15.3(±1)MPa
Resistencia compresión	UNE-EN 1926	71(±15)MPa
Carga rotura anclajes	UNE-EN 13364	1250 N
Coefficiente dilatación térmico		~0.006-0.015 mm/mC
Coefficiente dilatación higrométrico		~0.005-0.01 %
Resistencia cristalización sales	UNE-EN 12370	2.2 %

Tabla 2. Características mecánicas de la caliza.

Características	Norma de ensayo	Valores
Denominación	UNE-EN 12407	Caliza oolítica
Densidad aparente	UNE-EN 1936	2570 kg/m ³
Resistencia flexión carga concentrada	UNE-EN 12372	11.4(±1)MPa
Resistencia compresión	UNE-EN 1926	131(±14) MPa
Carga rotura anclajes	UNE-EN 13364	2000 (±200) N
Coefficiente dilatación térmico		~0.004-0.014 mm/mC
Coefficiente dilatación higrométrico		~0.008-0.025%
Resistencia cristalización sales	UNE-EN 12370	9 %

Para el sistema de cuelgue se usó un acero S275 con protección dúplex (HDG + C5M-H) y, aunque el sistema está diseñado para trabajar con contacto a hueso entre piedra y acero, se decidió conectar estos elementos con resina epoxy en

aras de una mayor seguridad y comodidad durante el montaje. Esta resina es bicomponente con 10 MPa de resistencia a tracción y cortante y un rango térmico de trabajo desde -40°C hasta 90°C.

2.1 Acciones

En los siguientes apartados se describen las principales singularidades del proyecto con respecto a las acciones a considerar.

2.1.1 Peso Propio

Como se comentaba anteriormente, una de las características que permiten dotar de la fuerza visual necesaria a estas obras es la profundidad de grabado de las letras. Después de varias pruebas se decidió que las letras en mármol tuvieran una profundidad máxima de 50 mm y en la caliza de 30 mm. Esta profundidad, que se traduce en un espesor adicional al necesario, es considerada en el cálculo como una carga muerta, ya que la superficie grabada representa un porcentaje pequeño en cuanto a material se refiere pero impide considerar este espesor como resistente dada la arbitrariedad en la posición de las letras.

Una vez conocido el espesor necesario para el grabado de las letras se puede obtener el espesor de panel necesario para resistir las acciones de diseño. Estos espesores son 50 mm para el mármol y 40 mm para la caliza. Esto hace un espesor total por panel de 100 mm en el caso del mármol y 70 mm en la caliza, arrojando un peso propio de 2.71 kN/m² y 1.8 kN/m² respectivamente.

El espesor dado a estos paneles supone que el peso a soportar por el sistema de cuelgue es muy superior al habitual en otro tipo de fachadas ventiladas, concretamente de hasta 5 veces más en el caso del mármol y 3.5 veces en el caso de la caliza [1].

2.1.2 Viento

El valor de la presión de pico se obtuvo a través de estudios en túnel de viento dentro de los trabajos de diseño global del museo llevados a cabo por Buro Happold Engineering.



Figura 6. Vista general del modelo usado en el túnel de viento.

Para el caso de fachadas sus valores fueron:

- Zonas externas: $\pm 1.3 \text{ kN/m}^2$
- Zonas internas: $\pm 0.8 \text{ kN/m}^2$

Estas presiones se adoptaron para el cálculo de los muros de piedra y se aplicaron sobre cada tipo de panel (zona central, esquinas, zona superior, etc.) de acuerdo con los coeficientes indicados en el Eurocódigo EN-1991-1-4 [2].

2.1.3 Temperatura

El rango de temperaturas esperado es de 40°C, con 50°C de temperatura máxima y 10°C de mínima.

2.1.4 Sismo

En la zona donde se emplaza el museo existe una aceleración de pico para suelo tipo A de 1.5 m/s². De acuerdo a las especificaciones dadas en el Eurocódigo EN-1998-1 [3] se obtuvo el periodo fundamental de cada panel y con ello la aceleración sísmica a aplicar para el cálculo de la piedra y de los elementos de anclaje.

Para la obtención del periodo fundamental de cada panel se utilizaron dos Modelos de Elementos Finitos (MEF): uno en el que el sistema de anclaje se consideraba infinitamente rígido (Figura 7) y otro con el sistema de anclaje

real (Figura 8), usando el periodo pésimo obtenido entre ambos.

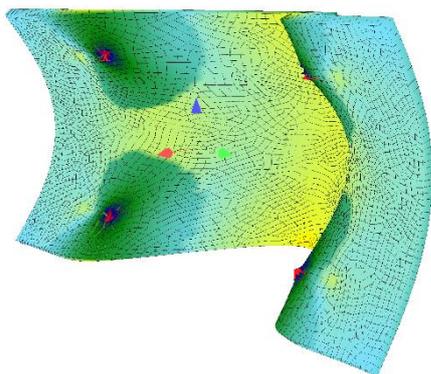


Figura 7. T=0.009s panel conexión rígida

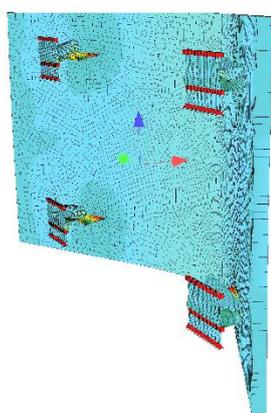


Figura 8. T=0.021s panel conexión completa

2.2 Piedra natural

Es este un material con una mayor dispersión estadística de sus características mecánicas que otros materiales con procesos de fabricación controlados. Dentro del macizo rocoso del que se extraen las piezas existen diaclasas, discontinuidades locales, vetas, etc. Todo ello puede generar dentro del panel poros o pelos que reducen significativamente la resistencia global de la pieza.

Para la consideración de estas discontinuidades y de la geometría del panel se consideraron los siguientes coeficientes de seguridad y valores característicos en el cálculo de la piedra:

- Valor característico de la resistencia considerando valor medio, desviación típica y número de ensayos de acuerdo con Eurocódigo 1990 [4].

- Coeficiente de minoración de resistencia del material de acuerdo a Eurocódigo 1990 [4].
- Coeficiente de minoración de resistencia por envejecimiento [5].
- Coeficiente amplificador debido a la distribución no homogénea de tensiones en la interfaz piedra-pletina obtenida mediante MEF.
- Coeficiente amplificador debido al factor K de amplificación de tensiones obtenido mediante MEF.
- Coeficiente amplificador K_2 debido al ángulo de desconchamiento [5].

2.3 Juntas

Dado el carácter ornamental de las fachadas, era necesaria la minimización de las juntas para lograr un acabado estético adecuado. La validación de la apertura de junta se realizó desde dos enfoques distintos explicados a continuación.

2.3.1 Enfoque estructural

De la forma habitual, se consideran las diferentes acciones recogidas en las bases de cálculo para obtener el rango máximo de movimiento esperado de los paneles. También se considera la apertura mínima de junta recomendada para montaje. La junta mínima obtenida de acuerdo a las dos premisas indicadas fue de 5 mm.

2.3.2 Enfoque estético

Para la validación por parte de la artista de la apertura de junta de 5 mm se construyó un bastidor auxiliar que permitía el movimiento de los paneles en el plano vertical, pudiendo ajustar con ello su separación para comparar diferentes aperturas. Para este bastidor se diseñó un sistema que permitía el deslizamiento horizontal de los paneles a través de una guía y su ascenso o descenso mediante dos tornillos en su parte posterior. Gracias a este sistema ambos movimientos podían ser realizados con la mano permitiendo a una sola persona mover cada

panel de 500 kg vertical y horizontalmente (Figuras 9 y 10).

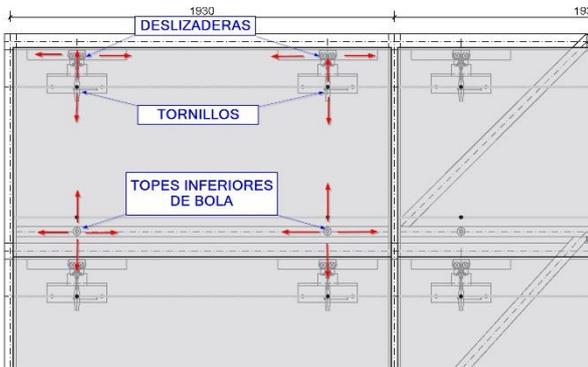


Figura 9. Vista general de panel en bastidor de prueba de juntas

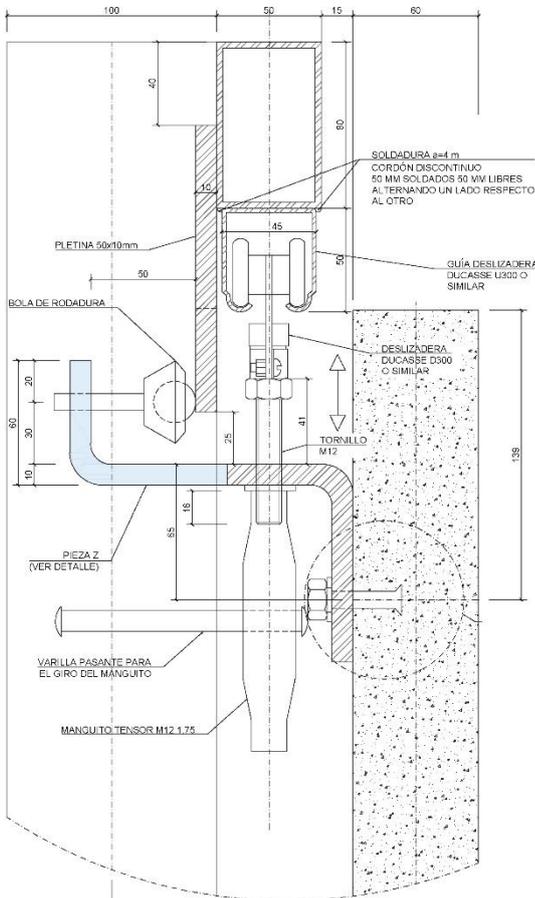


Figura 10. Detalle de sistema de movimiento de panel en bastidor de prueba de juntas

3. Diseño y cálculo

De acuerdo con los condicionantes y bases de cálculo referidos anteriormente se diseñó un sistema consistente en 4 pletinas metálicas por panel insertas en sendas ranuras con una inclinación de 60° con respecto al plano vertical (Figura 11).

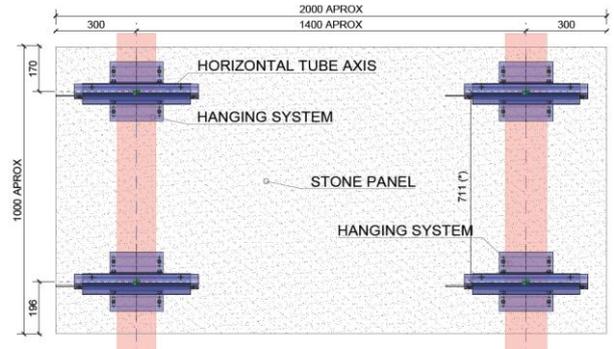


Figura 11. Vista general anclajes

Estas pletinas se introducen a su vez en los soportes metálicos que presentan una acanaladura horizontal para tal efecto. Los soportes metálicos se anclan a las guías verticales adosadas a la pared mediante un sistema de tornillos con agujeros ranurados con movimiento posible en los tres grados de libertad del plano de la unión, permitiendo absorber las posibles irregularidades de la pared. Estos agujeros ranurados se bloquean una vez fijado el soporte mediante resina epoxi (Figuras 12 y 13).

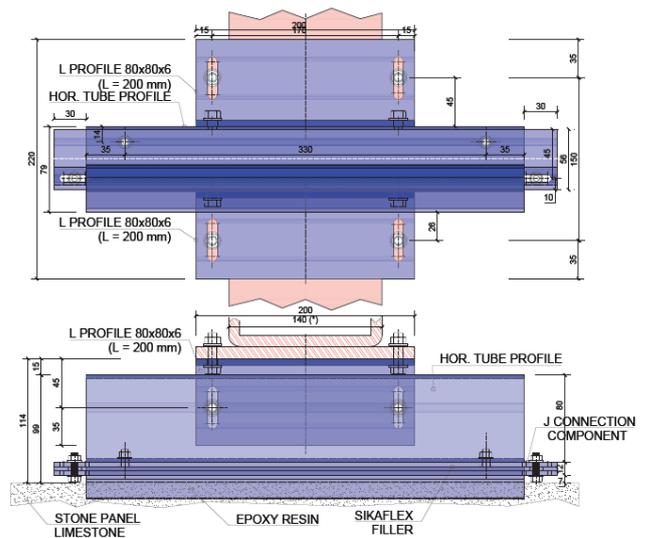


Figura 12. Alzado y planta sistema tipo de anclaje

piezas en el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETCC).

Se realizaron 4 tipos de ensayos:

1. Carga gravitatoria aumentando carga hasta rotura. 5 muestras de mármol y 5 muestras de caliza.
2. Carga de succión de Viento sin carga gravitatoria aumentando carga hasta rotura. 5 muestras de mármol y 5 muestras de caliza.
3. Carga de succión de Viento con carga gravitatoria constante y aumentando carga de viento hasta rotura. 5 muestras de mármol y 5 muestras de caliza.
4. Carga de succión de Viento con carga gravitatoria y aumentando ambas cargas (viento y gravitatoria) hasta rotura. 5 muestras de mármol y 5 muestras de caliza.

Los resultados obtenidos para cada escenario de carga fueron concordantes con lo calculado, apreciándose la rotura por las dos secciones críticas consideradas en función de la carga dominante para cada combinación. En las siguientes figuras (Figuras 17-20) se muestra un ejemplo de ambos tipos de rotura, así como el esquema de cargas utilizado.

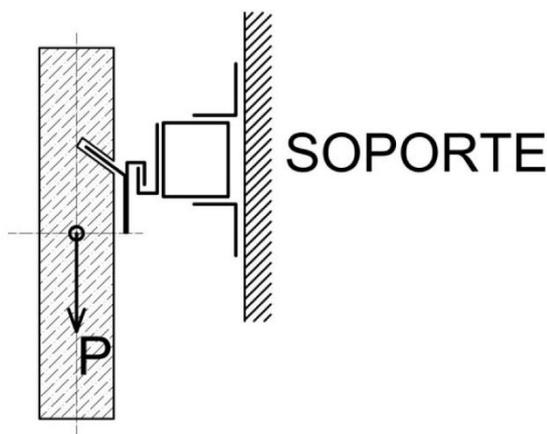


Figura 17. Esquema de carga para escenario de carga gravitatoria [6]



Figura 18. Modo de rotura bajo carga gravitatoria. Sección 2-2' [6]

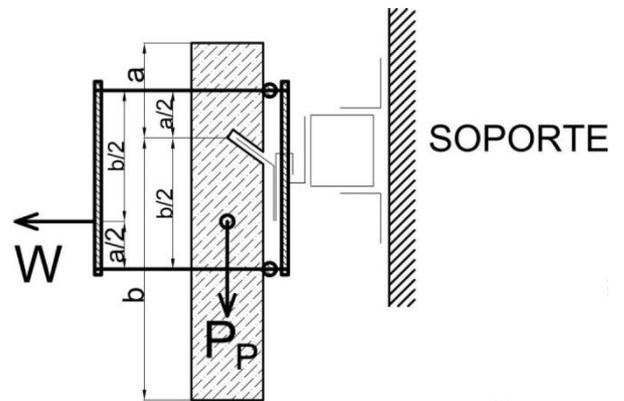


Figura 19. Esquema de carga para escenario de carga gravitatoria + succión de viento [6]



Figura 20. Modo de rotura bajo carga gravitatoria y succión de viento. Sección 1-1' [6]

Las cargas mínimas de rotura obtenidas para cada tipo de ensayo fueron (mármol y caliza respectivamente):

1. 22.7 kN y 14.5 kN
2. 3.3 kN y 3.1 kN
3. 8.8 kN y 5.1 kN
4. Pp: 4.6 kN/W: 8.6 kN y Pp: 3.0 kN/W: 5.1 kN

5. Ejecución y montaje

El fresado de los paneles de piedra se realizó mediante una máquina de Control Numérico por Computadora (CNC). El modelo digital a grabar en cada pieza era ajustado mediante programas de diseño asistido por ordenador antes de lanzarse a la fresadora. Una vez grabado el panel se procedía a ranurar su parte posterior e introducir en estas ranuras las pletinas de acero, que quedaban fijadas mediante un adhesivo epoxi (Figura 21). A continuación eran embarcadas hacia Abu Dhabi para su colocación en el museo.



Figura 21. Pletinas fijadas al panel mediante adhesivo epoxi

En paralelo al grabado de los paneles de piedra se fueron fabricando las más de 6000 piezas metálicas que conforman los sistemas de anclaje a los muros de hormigón. Estas piezas se fueron atornillando a las placas de espera de los muros utilizando un marco auxiliar que permitía ajustar el sistema a las irregularidades de la pared para lograr un acabado perfecto (Figura 22).



Figura 22. Marco auxiliar para ajuste de anclajes

Estas irregularidades fueron medidas mediante láser para ajustar el rasgado de los tornillos a la irregularidad máxima esperada.

La colocación de los paneles se realizó mediante izado con grúa telescópica desde el suelo (Figura 23). Los paneles se sujetaban a las eslingas de izado mediante pinzas que permitían un correcto agarre de la pieza sin dañar los grabados.



Figura 23. Izado de un panel

Todos los muros se comenzaron a montar desde el suelo, ascendiendo progresivamente en la colocación de los paneles hasta alcanzar la cota superior de muro (Figura 24), donde se cierra con una fila de acabado de paneles horizontales.



Figura 24. Vista general del montaje

6. Conclusiones

1. El uso de la piedra natural en estructuras singulares exige un cuidado proceso de cálculo y manufactura que tenga en cuenta las características intrínsecas de este material.

2. Es recomendable en este tipo de proyectos la verificación estructural de la solución a través de modelos numéricos y físicos.

3. El resultado final es una obra de gran fuerza visual y aparente sencillez que alberga en su conjunto meses de trabajo y esfuerzo de un heterogéneo grupo de profesionales (Figura 25).



Figura 25. Fachada JH1 terminada y abierta al público.

Referencias

- [1] E. Montero Fernández de Bobadilla, J Pérez Navarro, A. Álvarez Sandoval, Manual Básico. Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad, Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transportes de la C.A. Región de Murcia, 2007.
- [2] European Standard, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions, C.E.N., 2005.
- [3] European Standard, Eurocode 8: Design of

structures for earthquake resistance – Part 1- General rules, seismic actions and rules for buildings, C.E.N., 2004.

- [4] European Standard, Eurocode 0: Basis of structural design, C.E.N., 2002.
- [5] R. de Sousa Camposinhos, Stone cladding engineering, Springer, 2014.
- [6] IETCC, Informe N°21119-I Ensayos de Resistencia a la Carga Gravitatoria y a la Carga de Viento del Sistema de Fachada Ventilada de Piedra Ranurada, 2017.