

Cliffs of Concrete

The V&A Dundee, Scotland's first design museum, features a dramatic inverted pyramid design

by Deborah R. Huso

A concrete fortress balanced over the edge of the River Tay, the V&A Dundee, Dundee, Scotland, is the country's first design museum (Fig. 1). Featuring dramatic horizontal ledges of precast concrete, the three-story building's shape is that of two inverted pyramids (Fig. 2). Up close, the striated façade invokes images of the cliffs of the Scottish coastline (Fig. 3). From a distance, the building's form evokes a sturdy ship—a nod to the city's shipbuilding history (Fig. 4).

Designed by Tokyo-based Kengo Kuma & Associates, the complex structure of the £93 million (\$121 million USD) museum supports exterior walls that twist both horizontally and vertically. The building also features a cantilevered "prow" that extends nearly 20 m (65 ft) beyond the building's footprint. Throughout the design phases, the architect and engineering firm Arup, based in London, the United Kingdom, used three-dimensional (3-D) modeling to plan the building.

Structural Gymnastics

The building design was prompted by an international design competition sponsored by the city of Dundee in 2010. Maurizio Mucciola—formerly of Kengo Kuma & Associates but now directing his own design firm, PiM Studio in

London—served as project architect through the duration of the building's design and construction. "Kuma and I visited the site, which is quite special, being on a one-km-wide [0.6 mile] estuary of the river," he says. "It's an impressive setting, and the city of Dundee wanted us to reconnect the city with the river."



Fig. 2: The building has the form of two inverted pyramids (photo courtesy of HUFTON + CROW)



Fig. 3: The striated building façade invokes images of the Scottish coastline cliffs (photo courtesy of HUFTON + CROW)



Fig. 1: The V&A Dundee, Dundee, Scotland, looks like a concrete fortress balancing over the edge of the River Tay (photo courtesy of HUFTON + CROW)

Kuma's striking solution was to create a building that literally reaches out over the water. But there was more to this imposing museum's appearance than the water itself. Kuma also understood the museum's national importance, and so he wanted its exterior to reflect the Scottish landscape, using the country's northeast coast as inspiration for the striated cladding on the building.

The design phases took 2 years. Construction began in March 2015 and was completed in 2018.

The building's geometrical complexity necessitated the design teams use 3-D design tools (Fig. 5). "There are no straight lines," says John Tavendale, project manager with London-based Turner & Townsend, which managed the project's design and construction phases on behalf of the owner. "It required 3-D software from the start," he explains. "Looking at a traditional two-dimensional plan wouldn't have worked. If you look at the walls, they're curving in every direction. There's nothing that's the same shape."

Originally, the design team had planned to use precast concrete units for the structure of the building, according to Tavendale, but they determined that precast would not be practical for the building's dramatic cantilever. The designers and engineers then considered a hybrid structure of steel and concrete, but Kuma didn't like the way it would have divided the museum's interior. "[Cast-in-place] concrete allowed for [the desired] shapes and forms," Tavendale says, "while also keeping the weight minimal and allowing for the maximum occupiable space inside."



Fig. 4: From a distance, the building looks like a sturdy ship (photo courtesy of HUFTON + CROW)

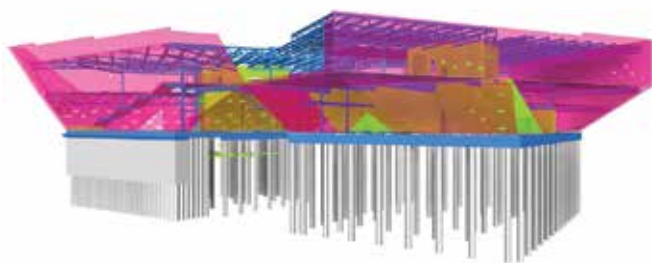


Fig. 5: Structural 3-D model of the museum (image courtesy of Arup)



Fig. 6: Two inverted pyramids are separate up to the second floor, at which point they are joined

"While the structure of the building is quite complex in terms of geometry," Mucciola says, "the principle is simple: the exterior of the building is a continuous shell wall." Floor slabs and the roof deck are supported by structural steel members tied to external walls, all of which are inclined outward.

A Hybrid of Concrete and Steel

Construction began, with the installation of a massive cofferdam filled with 12,500 tonnes (13,780 tons) of stone to hold back the River Tay while the museum's vast over-water prow was built. Work on the structure itself started 2 months later and involved erection of 21 separate wall sections, with no two alike (and none of them straight).

The two inverted pyramids that make up the building are separate up to the second level, where they are joined (Fig. 6). "There are no expansion joints," Tavendale explains. "[The museum] is an elastic shell designed to flex and move."

"The building is a hybrid structure of concrete and steelwork," explains Malcolm Boyd, Construction Manager for the Netherlands-based general contractor BAM. He continues, "The external walls, internal shear walls, and main cores are constructed using reinforced concrete, while the first floor, second floor, and roof are constructed using structural steelwork" (Fig. 7). Vertical loads are carried down the cores and façade walls to the foundation level. The foundation consists of a grillage of reinforced concrete ground beams spanning between individual pile caps that carry the building's load down to bedrock.

The walls rise an impressive 19.75 m (65 ft). "The external façade wall is inclined away from the building and relies on the roof and floor-level primary beams and trusses to tie it back to the building and provide stability from overturning forces and wind," Boyd adds. Because the façade wall supports the floor and roof steelwork but also relies on these elements for stability, the walls had to remain propped until the internal floor plates, beams, and slabs were fully tied into the structure and the concrete had reached design strength (Fig. 8). "The roof consists of a structural metal deck which



Fig. 7: The building is a hybrid structure with external walls, internal shear walls, and main cores constructed using reinforced concrete, and the first floor, second floor, and roof constructed using structural steelwork



Fig. 9: Façade walls made of dark and smooth concrete



Fig. 8: Façade walls remained propped until the internal floor plates, beams, and slabs were fully tied into the structure and the concrete had reached design strength

acts as a diaphragm between the steel roof beams and transfer trusses, which in turn span between the internal concrete cores and external façade wall,” Boyd explains. “Lateral stability is provided through the diaphragm action.”

The walls were constructed using formwork, with each wall divided into uniquely shaped 2 x 2 m (6.6 x 6.6 ft) blocks. Because of the complex geometry, each piece of formwork was bespoke, according to Boyd.

“It was like an enormous three-dimensional jigsaw,” Tavendale says. Each piece of formwork had a global positioning system (GPS) identifier to ensure it was correctly positioned within tolerance. All formwork and shoring had to stay in place until the roof was in place.

Formwork was positioned on-site by a crew of 30 joiners. Construction conditions were often challenging. “We were hanging things off of cranes in wind, rain, and snow,” Tavendale remarks. Yet despite the building’s complex design and the often trying construction conditions, the team

maintained the requisite (and astounding) 2 to 3 mm (0.08 to 0.12 in.) of tolerance for each piece’s placement.

Some of the concrete walls were up to 25 m (82 ft) high, and some were cantilevered. Yet even with such height, the walls were only 300 mm (12 in.) thick. Tavendale describes the building’s construction as “structural gymnastics.” The building is “overhanging and leaning out and leaning in,” he adds.

While the thin walls kept costs and weight down, they also created a host of other challenges. “They can create torsion,” Tavendale explains, “but we could not have cracking in these walls.”

“The concrete is a design feature in itself,” says Mucciola. Careys Civil Engineering tested many mixtures to accommodate Kuma’s desire for a very dark and smooth concrete for the walls (Fig. 9). The final mixture included fly ash and silica fume.

To ensure a high-quality finish, formwork supplier PERI, based in Weissenhorn, Germany, applied Zemdrain to the wall formwork. Zemdrain is a controlled permeability formwork liner that drains water from the surface of fresh concrete. This reduces the probability of microcracking and bugholes, and it renders the concrete denser and less permeable. The liner thus improves the appearance of concrete as it increases its resistance to environmental effects (in this case, the brackish water of the nearby estuary). “Every square meter of that façade is a different curvature,” Tavendale says. Each of the 2 x 2 m blocks of formwork exhibited different curvatures. It was an incredible challenge to make sure the concrete was compacted without any airspace or holes in the heavily reinforced walls.

Meanwhile, the beams spanning the floors and roof had to be tied into the walls via a concrete ring beam. Tavendale says there were 440 individually designed connections between the building’s structural steel and the concrete walls. Each piece of steelwork was bolted to anchors in the concrete at a unique angle. Once the formwork was removed, the deformation of the structure essentially welded the steelwork and bolts together.



Fig. 10: The cliff face appearance of the building's exterior was executed with 2429 precast concrete panels

“It was a very slow build,” Tavendale remarks. “But all those structural gymnastics were on the ground floor. Once you get to the second floor, everything straightens up.”

The Crowning Touch

The application of 2429 precast concrete panels—manufactured by Techcrete based in Dublin, Ireland—established the appearance of a cliff face on the building's exterior (Fig. 10). Techcrete applied a retarding agent onto the formwork to allow for the removal of a superficial layer of concrete, exposing some of the large aggregate and enhancing the rough surface of the panels.

Each precast panel was attached to the structure with brackets. Additionally, a 300 mm gap between adjacent planks was designed to create the “stacked” appearance of the walls.

The precast panels weighed up to 2000 kg (4410 lb) with spans of up to 4 m (13 ft). The high loads and complex geometry complicated the design of the connections to the thin and heavily reinforced walls. Drilling into the cast-in-place walls would risk weakening the structure, so the team cast channel anchors into the walls, using a total station to

make sure every bracket was in the right place. Despite a tiny tolerance, only three of approximately 5000 preplaced anchors needed to be moved, according to Mucciola.

Boyd says installing the precast planks was a challenge due to the building's outward inclining walls. First-level panels were installed using a lift truck. Second- and third-level panels were installed using mobile cranes. To prevent the crane ropes from snagging on the building above, the team designed a bespoke, counterbalanced rig they could alter for different sections and angles of the walls.

The museum was opened in September 2018. “I learned that nothing is impossible if you get the right team with the right solutions,” Mucciola says of the project. “We didn't accept bad compromises; we kept working till we solved the problem.”

Success ensued.

Project Credits

Owner: Dundee City Council
 Design Architect: Kengo Kuma & Associates
 Structural Engineer: Arup
 Project Manager: Turner & Townsend
 Contractor: BAM Construct UK
 Subcontractor: Careys Civil Engineering
 Precast Concrete Producer: Techcrete

Selected for reader interest by the editors.



Deborah R. Huso is Creative Director and Founding Partner of WWM, Charlottesville, VA, USA. She has written for a variety of trade and consumer publications, such as *Precast Solutions*, *U.S. News and World Report*, *Concrete Construction*, and *Construction Business Owner*. She has provided website development and content strategy for several Fortune 500 companies, including Norfolk Southern and GE.

Read
CI Online
 cover-to-cover

A flip-book version of the entire current issue of *CI* is available to ACI members by logging in at www.concreteinternational.com. Click “download the issue” on the magazine's home page.



American Concrete Institute
Always advancing

Precipicios de Concreto

El primer museo de diseño de Escocia, el V&A Dundee es caracterizado por un diseño dramático de pirámides invertidas

Por Deborah R. Huso

La fortificación de concreto la cual está balanceada a la orilla del Río Tay en Dundee, Escocia es el primer museo de diseño del país (Figura 1). El edificio de tres pisos V&A Dundee tiene forma de dos pirámides invertidas y se caracteriza por sus aleros horizontales de concreto prefabricado (Figura 2). De cerca, las estrías en la fachada invocan imágenes de los despeñaderos de la costa marítima escocesa (Figura 3). A distancia, la forma del edificio trae a memoria lo vigoroso de una embarcación – alusión a la histórica construcción naval de la ciudad (Fig. 4).

La estructura compleja del museo de £93 millones (\$121 millones USD) fue diseñada por Kengo Kuma & Associates de Tokio y soporta paredes exteriores las cuales se tuercen tanto horizontal como verticalmente. El edificio también cuenta con una “proa” en voladizo la cual se extiende a unos 20 m (65 ft) más allá de su huella. Durante las fases de diseño, la firma de arquitectura e ingeniería Arup, con sede en Londres, utilizaron modelación en tres dimensiones (3-D) para la planificación del edificio.



Figura 1: El V&A Dundee, Dundee, Escocia, parece ser una fortificación balanceada sobre la orilla del río Tay (fotografía cortesía de HUFTON + CROW)

Gimnasia Estructural

El diseño del edificio surge por una competencia internacional de diseño promovido por la ciudad de Dundee en el 2010. Durante el proceso de diseño y construcción el arquitecto del proyecto fue Maurizio Mucciola – anteriormente parte de Kengo Kuma & Associates, pero ahora dirige su propia firma de diseño, PiM Studio en Londres. “Kuma y yo visitamos el lugar del proyecto el cual es bastante especial por estar en un estuario de un kilómetro de ancho [0.6 millas] dice el arquitecto. “La localización es impresionante y la ciudad de Dundee quería que volviéramos a reconectar el río con ella”.

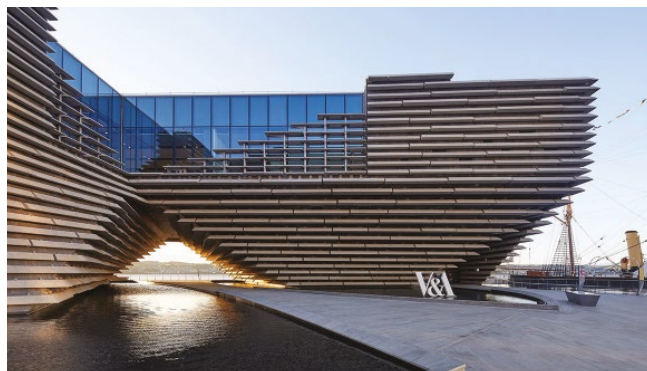


Figura 2: El edificio tiene forma de dos pirámides invertidas (fotografía cortesía de HUFTON + CROW)



Figura 3: Las estrías en la fachada invocan imágenes de los despeñaderos de la costa marítima escocesa (fotografía cortesía de HUFTON + CROW)

La llamativa solución de Kuma fue crear una edificación que literalmente sobrepasará el agua, pero había más en la apariencia de este imponente museo que la misma agua. Kuma también entendía la importancia nacional del museo, por lo cual quería reflejar el paisaje escocés, utilizando la costa noreste del país como inspiración para el revestimiento escalonado del edificio.

Las fases de diseño tomaron 2 años. La construcción comenzó en marzo de 2015 y culminó en el 2018. La complejidad geométrica del edificio exigió del equipo de diseño el uso de herramientas 3-D. “No hay líneas de rectas,” dice John Tavendale, gerente de proyecto de Turner & Townsend de Londres, quienes administraron las fases de diseño y construcción del proyecto a favor del dueño. “Ver un plano de dos dimensiones no hubiese funcionado. Si ven las paredes, estas se doblan en todas direcciones. No hay nada con la misma forma.”

Originalmente, el equipo de diseño planificó usar unidades de concreto prefabricado para la estructura del edificio, de acuerdo con Tavendale, pero determinaron que la prefabricación no sería práctico para el dramático voladizo del edificio. Los diseñadores e ingenieros consideraron una estructura híbrida en acero y concreto, pero a Kuma no le gustó la manera en que dividiría los interiores del museo. “concreto [fundido en sitio] permitió la configuración y formas,” dice Tavendale, “al mismo tiempo que se mantiene el peso a un mínimo y permitiendo la ocupación máxima del espacio interno.”

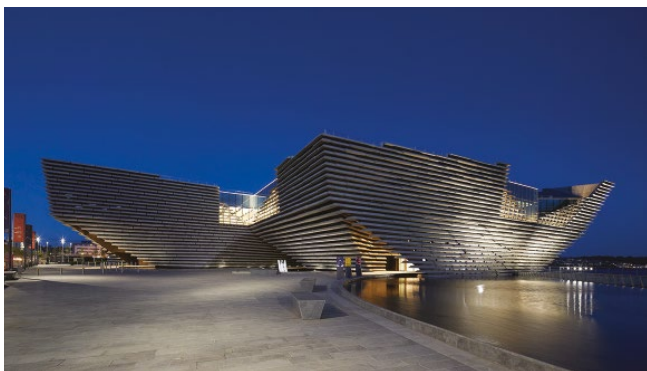


Figura 4: A distancia, el edificio parece ser una embarcación (fotografía cortesía de HUFTON + CROW)

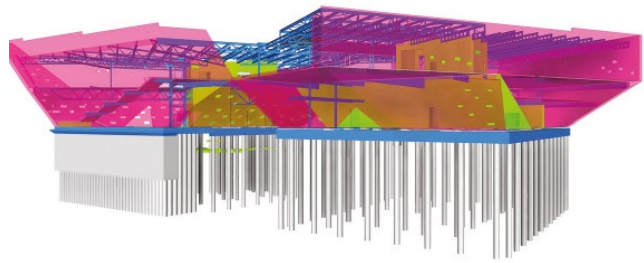


Figura 5: Modelo estructural 3-D del museo (imagen cortesía de Arup)

“Mientras que la estructura del edificio es bastante compleja en términos de geometría,” dice Mucciola, “el principio es sencillo: el exterior del edificio es un caparazón continuo.” Las losas de piso y el techo están apoyadas por miembros de acero estructural sujetos a las paredes externas, las cuales están inclinadas hacia afuera.”

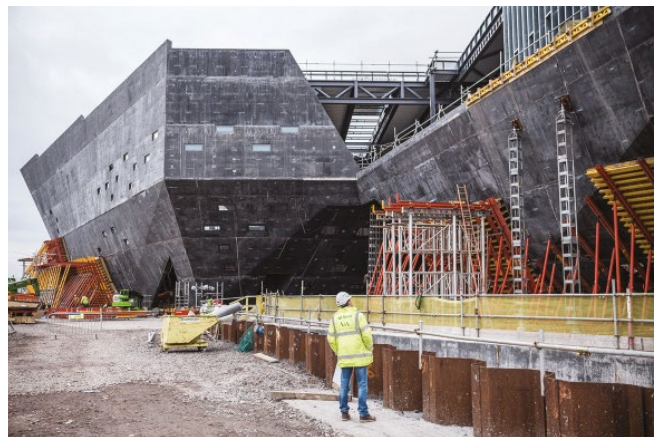


Figura 6: Dos pirámides separadas hasta el segundo piso, en donde se juntan

Un Híbrido de Concreto y Acero

La construcción comenzó con la instalación de un masivo dique de 12,500 toneladas métricas (13,780 toneladas imperiales) de rocas para retener el Río Tay mientras se construía la enorme proa del museo. Luego de 2 meses fue que comenzó el trabajo en la estructura la cual involucró la erección de 21 secciones de paredes, ninguna parecida (y ninguna derecha).

Las dos pirámides invertidas que hacen el edificio están separadas hasta el segundo nivel, en donde se juntan (Fig. 6). “No hay juntas expansivas,” explica Tavendale. “[El museo] es un caparazón elástico diseñado para flexionar y moverse.”

“El edificio es una estructura híbrida de concreto y acero,” explica Malcom Boyd, Gerente de Construcción para el contratista general BAM de los Países Bajos. El continúa, “Las paredes externas, paredes cortantes internas, y el núcleo principal son construidos utilizando concreto armado, mientras que el primer piso, segundo piso y techo son construidos utilizando acero estructural.” (Fig. 7). Los esfuerzos verticales son dirigidos hacia la fundación a través de los núcleos y fachada. La fundación consiste en una rejilla de vigas en concreto armado que se extienden sobre pilas individuales que transfieren las cargas al cimiento.



Figura 7: El edificio es una estructura híbrida con paredes externas, paredes cortantes internas y núcleos construidos utilizando concreto armado, y el primer piso, segundo piso y techo son construidos utilizando acero estructural



Figura 8: Paredes de fachada permanecieron apoyadas hasta que las placas del piso, vigas y losas fueran aseguradas a la estructura y el concreto alcanzara su fuerza de diseño

Las paredes crecen unos impresionantes 19.75 metros (65 pies). Boyd añade, “la fachada externa está inclinada hacia afuera del edificio y depende de las vigas principales y cerchas del techo y piso primario para proveer estabilidad contra fuerzas de vuelco y

vientos”. Debido a que las paredes de fachada sostienen el acero del piso y techo, pero de igual manera dependen de estos elementos para estabilidad, las paredes tuvieron que ser apoyadas hasta que las placas de los pisos internos, vigas, y losas estuviesen completamente aseguradas a la estructura y el concreto alcanzara su fuerza de diseño (Fig.8). “El techo se compone de una cubierta de metal estructural el cual actúa como un diafragma entre las vigas de acero del techo y las cerchas de transferencia, que a su vez se extienden entre los núcleos de concreto y las paredes de fachada externa,” explica Boyd. “La estabilidad lateral es provista a través de la acción del diafragma.”

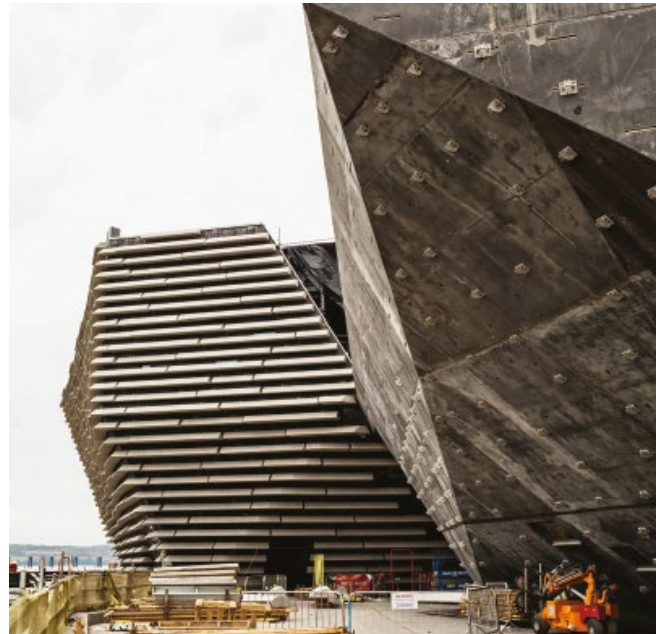


Figura 9: Paredes de fachada hechas en hormigón oscuro y liso

Las paredes fueron construidas utilizando encofrados, con cada pared dividida por moldes únicos de 2 x 2 m (6.6 x 6.6 ft). Debido a la geometría compleja, cada pieza del encofrado fue hecho a la medida, según Boyd.

“Fue como un enorme rompecabezas de tres dimensiones,” dice Tavendale. Cada pieza del encofrado tenía un identificador de sistema de posicionamiento global (GPS) para asegurar que fuera posicionado dentro de la tolerancia. Todos los encofrados y puntales tuvieron que permanecer en su lugar hasta que el techo estuviese listo.

El encofrado fue posicionado en sitio por un grupo de 30 ensambladores. Las condiciones de construcción fueron a menudo desafiantes. “Estábamos colgando cosas de las grúas con viento, lluvia y nieve,” comenta Tavendale. A pesar del complejo diseño del edificio y de condiciones retadoras de construcción, el equipo mantuvo el requisito (y asombrosa) tolerancia de 2 a 3 mm (0.08 a 0.12 in) en la colocación de cada pieza.

Algunas de las paredes de concreto eran de hasta 25 m (82 ft) de alto, y algunas eran en voladizo. Aun con tal altura, las paredes solo eran 300 mm (12 in) en espesor.

Tavendale describe que la construcción del edificio como “gimnasia estructural”. Añade que el edificio está “sobresaliendo e inclinándose hacia afuera y hacia adentro”. Mientras que las paredes finas mantenían el costo y peso bajo estas creaban numerosos retos. “Pueden crear torsión,” explica Tavendale, “pero no podíamos tener fisuras en estas paredes.”

“El concreto es una característica de diseño por sí misma,” dice Mucciola. Careys Civil Engineering probó muchas mezclas para acomodar el deseo de Kuma de tener un concreto oscuro y liso para las paredes (Fig. 9). La mezcla final incluía ceniza volante y humo de sílice.

Para asegurar una terminación de alta calidad, el proveedor de encofrados PERI, en Weissenhorn, Alemania, aplicó Zemdrain a las paredes del encofrado. Zemdrain es un revestimiento de permeabilidad controlada para el encofrado, el cual drena el agua de la superficie en el concreto fresco. Este reduce las probabilidades de micro fisuras y ampollas, y hace que el concreto sea más denso y menos permeable. El revestimiento por tanto mejora la apariencia del concreto a medida que incrementa su resistencia a efectos ambientales (en este caso, el agua salobre del estuario cercano). “Cada metro cuadrado de la fachada es de diferente curvatura,” dice Tavendale. Cada uno de los bloques de 2 x 2 m de encofrado exhibía diferentes curvaturas. Fue increíblemente retador asegurarse que el concreto estuviese consolidado sin vanos de aire y huecos en la pared densamente reforzada.

Mientras tanto, las vigas que se extienden por los pisos y techo tuvieron que ser sujetas por vigas de anillo en concreto. Tavedale dice que había 440 conexiones diseñadas individualmente entre el acero estructural y las paredes de concreto del edificio. Cada pieza de acero fue atornillada a anclajes en el concreto a un ángulo único. Una vez los encofrados fueran removidos, esencialmente la deformación de la estructura soldaría el acero y los tornillos juntos.



Figura 10: La apariencia de acantilado en el exterior del edificio fue ejecutado con 2429 paneles prefabricados de hormigón

“Fue una construcción muy lenta,” comenta Tavendale. “Pero toda esa gimnasia estructural fue en la planta baja. Una vez llegas al segundo piso, todo se endereza.”

El Toque de Coronamiento

La aplicación de 2429 paneles de concreto prefabricado – manufacturado por Techcrete de Dublín, Irlanda – estableció la apariencia de un acantilado en el exterior del edificio (Fig. 10). Techcrete aplicó el agente retardante en los encofrados para permitir la remoción de una capa superficial del concreto, descubriendo parte del agregado grueso y aumentando la superficie áspera de los paneles.

Cada panel prefabricado fue unido a la estructura por angulares. Adicionalmente, un espacio de 300 mm entre planchas adyacentes fue diseñado para crear la apariencia “apilada” de las paredes.

Los paneles prefabricados pesaban hasta unos 2000 kg (4410 lb) y se extendían hasta 4 m (13 ft). Las altas cargas y compleja geometría complicaron el diseño de conexiones a las paredes delgadas y densamente reforzadas. Barrenar las paredes arriesgarían el debilitamiento de la estructura, por lo cual el equipo fundió anclajes de canal en las paredes, utilizando una estación total para asegurarse que todos los angulares están en el lugar correcto. A pesar de la diminuta tolerancia, solo tres de aproximadamente 5000 anclajes tuvieron que ser movidos, de acuerdo con Mucciola.

Boyd dice que fue un reto instalar las planchas prefabricadas debido a la inclinación hacia afuera del edificio. Los paneles del primer nivel fueron instalados utilizando un montacargas. Los paneles de segundo y tercer nivel fueron instalados utilizando grúas móviles. Para evitar que las cuerdas de las grúas se engancharan arriba del edificio, el equipo diseñó a la medida, una plataforma de contrapeso que se pudiera alterar para cada sección y ángulo de las paredes. El museo abrió en septiembre de 2018. “Aprendí que nada es imposible si tienes el equipo correcto con las soluciones correctas,” dice Mucciola del proyecto. “No aceptamos compromisos malos; seguíamos trabajando hasta solucionar el problema.”

Resultado exitoso.

Créditos del Proyecto

Dueño: Dundee City Council

Arquitecto de Diseño: KengoKuma & Associates

Ingeniero Estructural: Arup

Gerente de Proyecto: Turner & Townsend

Contratista: BAM Construct UK

Subcontratista: Careys Civil Engineering

Productor de Concreto Prefabricado: Techcrete



Deborah R. Huso es Directora Creativa y Socio Fundador de WWM, Charlottesville, VA, USA. También ha escrito para una variedad de publicaciones de la industria y consumidores, tales como, Precast Solutions, U.S. News and World Report, Concrete Construction, y Construction Business Owner. Ha aportado al desarrollo de sitios web y estrategias de contenido para varias compañías en los Fortune 500, incluyendo Norfolk Southern y GE.

La traducción de este artículo correspondió a la Sección Puerto Rico.

Título: Precipicios de Concreto.



Traductor: José M. Mejía Borrero



Revisor Técnico: Ing. Rubén Segarra Montelara