

El Museo de Arte Moderno de Río de Janeiro constituye, posiblemente, el momento álgido de la carrera profesional de Affonso Eduardo Reidy. Como ha sido suficientemente justificado por otros analistas de su obra con anterioridad, se trata, sin duda, de un edificio paradigmático en lo que se refiere a los postulados y convicciones del Movimiento Moderno.

Ahora bien, a diferencia de lo que ocurre con respecto al concepto arquitectóni-



es más bien escasa. De hecho, al efecto de juzgar la bondad de dicha estructura en su vertiente más intrínsecamente mecánica, tan solo se ha dispuesto de la parte relevante del contenido de la Tesis Doctoral redactada por Eline Caixeta¹, y en especial alguna descripción técnica contenida en ella. Este escenario es el que justifica el título de este artículo: "una cierta aproximación a la estructura". Dicha aproximación se plantea en los términos que se expondrán más adelante pero, en todo caso, se basa en la interpretación progresivamente más compleja y precisa de unos datos que el rigor científico seguramente calificaría de poco canónicos: algunos esquemas parciales con escasa o nula definición dimensional, unas pocas fotografías del proceso de construcción del propio edificio y algunos párrafos en los que se recogen datos parciales de las características de la estructura. En todo caso,

la mayor parte de ellos están referidos al Bloque de Exposiciones.

Cabe comenzar por reseñar someramente, a fin de evitar innecesarias repeticiones con otros documentos contenidos en esta misma publicación, que el edificio del Museo de Arte Moderno se articula, básicamente, en torno a tres bloques: el Bloque de Exposiciones, el Bloque Escuela y el Teatro.

Desde el punto de vista del análisis estructural, sin lugar a dudas es el primero de ellos el más representativo de la totalidad de la construcción y, por otra parte, es el único del que se dispone de un volumen de información que, aún siendo mínimo, cuanto menos permite la emisión de un juicio suficientemente fundado.

Un ejemplo suficientemente representativo de la calidad de dicha información lo constituyen los dos esquemas que se incluyen en la página siguiente. El primero de ellos (fig. 2) corresponde a una sección transversal del citado Bloque de Exposiciones, mientras que el otro (fig. 3) recoge un despiece de armaduras "cualitativo" de uno de los pórticos principales del mismo.

De forma muy sucinta cabe manifestar que el edificio se asienta sobre un terreno de muy escasa calidad geotécnica en lo que concierne a sus estratos más superficiales, por lo que Reidy proyectó para el mismo una cimentación del tipo que hoy denominaríamos profundo. Concretamente, se trata del equivalente de nuestros actuales pilotes: estacas Franki de 23 m. de longitud.

La estructura del Bloque de Exposiciones se genera mediante una superposición de pórticos transversales de hormigón armado, espaciados a 10 m. entre sí, que soportan hasta tres niveles de forjado, además del suelo de la planta baja.

El pórtico se concibe mediante la superposición de dos subestructuras relativamente independizadas dentro del

mismo pórtico. De cada uno de los dos apoyos del mismo surgen dos pilares inclinados, uno hacia el interior y el otro al exterior. Mientras el primero de ellos soporta el forjado del primer piso, el segundo se cierra sobre sí mismo a nivel de la cubierta general del edificio, y de él se suspenden tanto la propia cubierta como el forjado de la segunda planta.

La totalidad de los elementos primarios que componen cada uno de estos entramados son de sección variable, a excepción de las grandes vigas de cubierta, por las razones que fácilmente se entenderán más adelante.

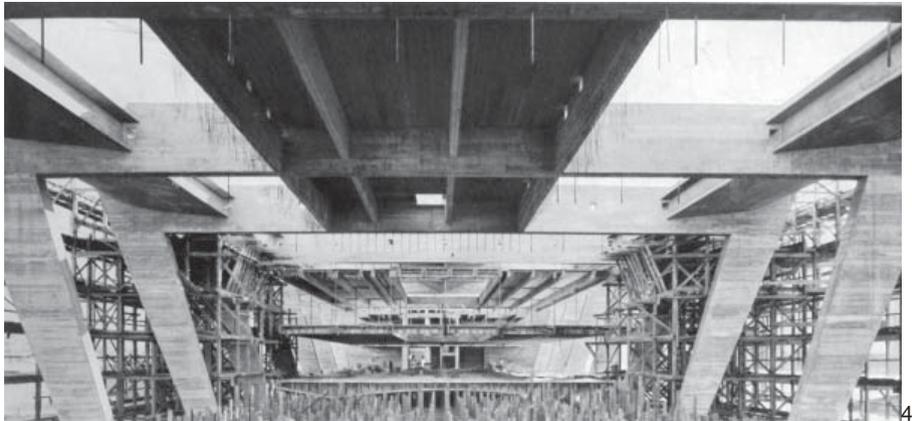
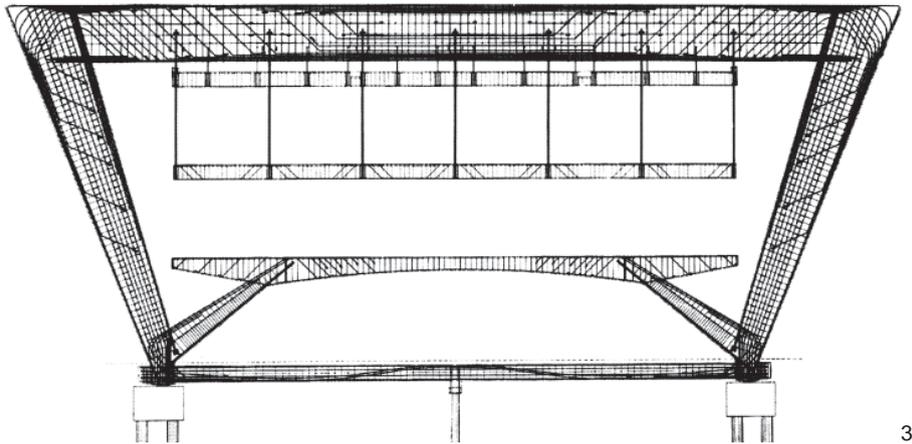
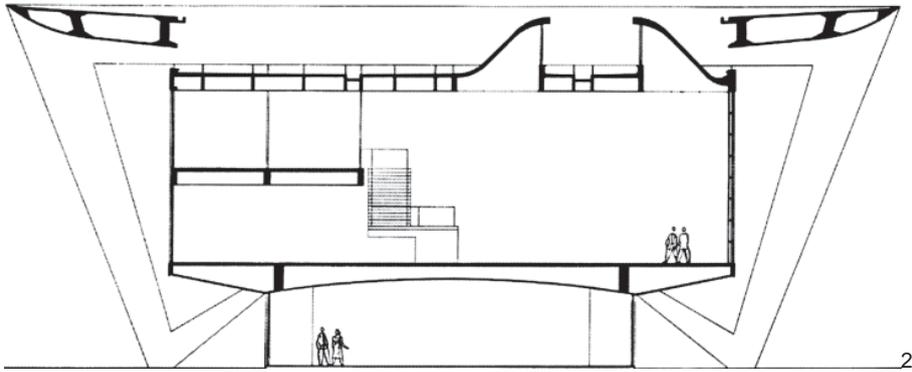
El arriostamiento de estos pórticos se consigue mediante las dos grandes vigas longitudinales aligeradas que entregan contra los dos nudos del pórtico exterior, así como a través de la lámina plegada dispuesta asimismo a nivel de la cubierta sobre el eje del edificio. También ofrece alguna colaboración al respecto el forjado de la planta primera, aunque dicha colaboración hay que entenderla no tanto en cuanto a la estabilización general del edificio, sino a la de la propia planta.

Teniendo en cuenta que tanto el pórtico "exterior" como el "interior" tienden a provocar empujes laterales sobre la cimentación dirigidos siempre hacia el exterior del edificio, así como el tipo de cimentación del que inevitablemente tenía que hacerse uso, Reidy previó la disposición de una riostra transversal en cada uno de los pórticos, que permitiese absorber estas fuerzas y que las mismas no llegasen a transmitirse sobre unos cimientos escasamente dotados para soportarlos.

Llegados a este punto merece ya la pena efectuar algunas consideraciones previas.

Evidentemente, lo que podríamos calificar como la estructura excelsa es algo que va más allá de la simple función resistente. Cuando una catedral gótica se resumía como "la suma de la estructura y el ornamento" se estaba reconociendo

1. A. E. Reidy. Museo de Arte Moderno, Río de Janeiro, 1953. Vista de la galería de exposiciones del primer piso en construcción



implícitamente el carácter esencialmente estructural, o cuanto menos estático, de cualquiera de los elementos constructivos que la integran; por supuesto, de sus arcos, bóvedas, columnas, arbotantes, etc.; pero también de algunos componentes supuestamente formales, tales como los pináculos que, sin embargo, resultaban determinantes en la canalización de los empujes generados por el trabajo a compresión de la obra de sillería.

En este sentido, el Museo de Arte Moderno, como toda obra paradigmática -en este caso del propio Movimiento Moderno- bebe en la esencia del hecho estructural: la estructura no sólo es el soporte del edificio sino que define su propia esencia.

De este modo, el edificio se organiza para convertirse a la vez en parasol y lucernario: para confinarlo y permitir que se expanda; para proteger al hombre de la naturaleza y para acercarlo a ella.

Y este control del espacio y de la luz se consigue sin recurrir al empleo de elementos retóricos. Los pilares externos hacen variar su sección para adaptarse al máximo a su distribución de esfuerzos y a su relación específica con la cimentación. Los internos, para responder a los anteriores y para optimizar el mecanismo laminar del forjado de la planta primera. Las grandes jácenas de cubierta, en cambio, mantienen constantes sus secciones porque así lo hacen aconsejable sus leyes de momentos flectores. Los elementos de arriostramiento de la cubierta se pliegan sobre sí mismos o se expanden, aligerándose por el interior, para alcanzar su máxima eficacia mecánica, a la vez que resuelven la formación de parasoles y lucernarios.

Intentando trascender este primer nivel de análisis arquitectónico-estructural, al efecto de fundamentar al máximo este juicio técnico sobre un edificio proyectado hace ya casi medio siglo, se ha efectuado una aproximación al mismo seguramen-

te poco canónica respecto a la "crítica estructural".

Y se ha hecho así por dos motivos.

En primer lugar porque la escasa información disponible sobre el tema hacía de todo punto imposible la adopción de una estrategia de carácter "forense".

En segundo lugar porque no existe juicio más fundado que el que resulta de la recreación del propio proceso del proyecto, mediante el desarrollo de toda la estrategia de prueba-error inherente al mismo.

Así, dicha estrategia se ha basado en la puesta en práctica de una aproximación a la parte más documentada y posiblemente representativa del edificio -el Bloque de Exposiciones- calificable como arqueológico-estructural, en el sentido de ir recabando progresivamente más información a medida que ésta iba resultando necesaria. Evidentemente, y dado el escaso volumen de la documentación aún así realmente disponible, en algunas ocasiones esta información adicional es poco más que una mezcla de certeza e intuición; casi una sugerencia más que una imposición, como en alguna medida lo es el propio edificio.

Siguiendo esta línea, se ha comenzado por trabajar sobre lo que podría entenderse como un "escenario previsible".

Disponiendo de algunos datos ciertos, como la separación de 10 m. entre pórticos principales y de unos 27 m. entre ejes de los apoyos del propio pórtico principal, y la sección a escala indeterminada incluida anteriormente, se ha procedido a fijar el resto de variables relevantes en unos valores considerables "lógicos" en principio.

Así, se ha adoptado una resistencia característica de 250 kg/cm² para el hormigón, unos espesores de losa de 20-25 cm. para aquellos forjados que soportan sobrecargas de uso importantes, y de 10-15 cm. para los que no lo hacen (por ejemplo, los de cubierta), y para las propias cargas se han fijado

unos valores "razonables" (unos 500 kg/m² para los forjados de piso y del orden de 150 kg/m² para los de cubierta).

En este supuesto, se han obtenido los resultados cuyas cifras más representativas se incluyen en los diagramas de la página siguiente (fig 5, 6 y 7).

Como puede apreciarse fácilmente, mientras algunos de estos resultados son completamente aleccionadores, otros no lo son tanto.

A título de ejemplo, puede comprobarse que las leyes de momentos flectores de los pilares que soportan la cubierta se adaptan excelentemente a la geometría de dichos pilares, que los valores de los momentos máximos, positivos y negativos, de la propia jácena de cubierta alcanzan unos valores muy similares -justificando así el carácter constante de la sección de tal elemento- y, finalmente, que los momentos negativos de la viga de la planta primera son claramente superiores al positivo de centro de vano, haciendo también perfectamente comprensible la morfología de esta jácena.

En cambio, resultan extremadamente insatisfactorios los valores obtenidos para las flechas, del orden de 10 cm. en el caso de la viga de cubierta y, lo que es peor, aún claramente superiores en la viga del primer piso, por tratarse de un forjado accesible y ser su luz menor, con lo que la flecha relativa es doblemente mayor.

Ante esta situación, se ha optado por efectuar un segundo acercamiento, más riguroso, a los datos del proyecto ofrecidos por la tesis doctoral a la que anteriormente se hizo referencia.²

Asimismo, también han resultado determinantes los contenidos de los cuatro documentos que se reproducen en las páginas 70 y 71: un esquema del control de descimbrado (fig. 8), unas fotografías de la construcción (fig. 9 y 10) y una sección transversal por la Biblioteca del Bloque de Exposiciones (fig. 11 y 12).

A la vista de estos datos se ha proce-

2. Sección transversal del bloque de exposiciones
3. Despiece "cualitativo" de armaduras del pórtico principal
4. Vista de la estructura durante la construcción

es más que perfectamente entendible, tanto por la heterogeneidad intrínseca del hormigón, como por la dificultad de trazar una correlación totalmente exacta entre los conceptos de resistencia media y resistencia característica del propio hormigón.

A continuación, se ha ignorado, por el momento, el hecho de que las vigas de riostra que unen los dos apoyos de cada pórtico se postesasen a 200 T., entendiéndose que tal recurso podía obedecer simplemente a la voluntad de evitar la existencia de un elemento de hormigón armado sometido a simple tracción, y por tanto fisurado, embebido en el terreno.

En cambio, sí se ha prestado atención a la sección por la Biblioteca del Bloque de Exposiciones, a las fotografías del inicio de la construcción de los pórticos principales y a la vista parcial de una de las fachadas extraída de Internet. Concretamente, en la referida sección se observa, prestando atención al forjado de la planta baja, que, a igualdad que en los tramos de forjado de los arriostramientos extremos de la cubierta, y a diferencia de los correspondientes a la parte de la propia cubierta suspendida de la jácena principal y al forjado de la planta segunda, se halla regruesada tanto la superficie superior como la inferior de la envolvente del piso.

Si, además, se compara el acabado de hormigón de la cara inferior de los mencionados "sandwiches" extremos de arriostramiento del forjado de cubierta con el de la misma cara -la inferior- del forjado del primer piso, parece inferirse una conclusión difícilmente rebatible: dicho forjado, el del primer piso, tiene la misma naturaleza que el de cubierta; está formado por dos láminas exteriores, superior e inferior, de hormigón nervadas entre sí. De otro modo no se entendería que una sola losa de hormigón, con un espesor aparente de unos 20-25 cm., pudiese superar luces entre pórticos de 10 m. o, lo que sería todavía más desfavorable,

luces entre jácenas longitudinales apoyadas sobre los pilares que soportan este forjado aún mayores.

Ante estas observaciones, mitad certeza mitad apariencia, se ha procedido a efectuar una nueva modelización del resto del proceso de construcción y de la entrada en servicio de la estructura que contemplase todos estos datos.

Los resultados de esta segunda aproximación se incluyen en la página 73. Dichos resultados se concretan en un primer esquema en el que se superponen las acciones consideradas en el cálculo y las deformaciones derivadas de su actuación, y otro correspondiente al diagrama de momentos flectores.

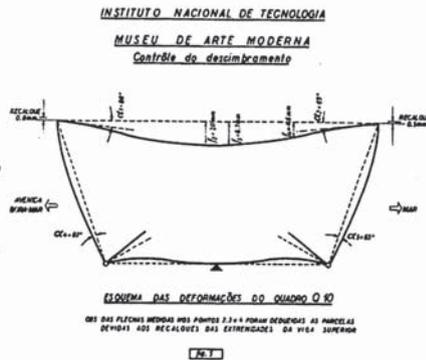
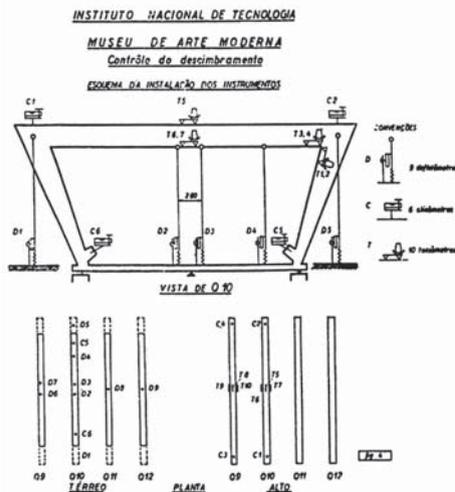
Dicho diagrama debe entenderse aditivo al que se incluye en tercer lugar en la misma página, y que corresponde a las leyes de momentos flectores producidas en la primera etapa (descimbrado de las jácenas principales, quedando sometidas a sus pesos propios más los de las lajas de forjado aligerado situadas en ambos costados del pórtico, que finalmente actuarán como arriostramiento del mismo en el sentido longitudinal de la nave).

Como puede apreciarse, los resultados que se obtienen ahora son más aleccionadores.

Si bien siguen manteniéndose mayoritariamente las concordancias registradas en la primera aproximación llevada a cabo (considerando una sola fase de descimbrado para el conjunto de la estructura), tales como la adaptación de las leyes de flectores de los pilares principales a las geometrías variables de éstos, y la similitud entre los máximos valores positivos y negativos de momentos para las jácenas de cubierta, que justifican su sección constante, ahora se aprecian otras dos circunstancias que conviene reseñar:

- El momento final positivo en el centro de las citadas jácenas de cubierta es de 1.726 mxT (suma de los 459 mxT de la primera fase y los 1.267 mxT de

5. Esquema del pórtico modelizado
6. Diagrama de momentos flectores
7. Esquema de la deformada



la segunda), muy próximo a los 2.000 mxT citados en la referencia de Matta y Carneiro & Valle. La diferencia del 14% puede obedecer simplemente a pequeñas divergencias en la estimación del estado de cargas.

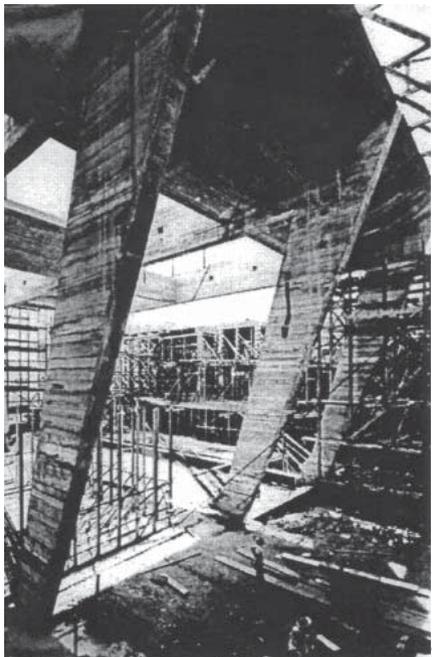
- La flecha total en la sección central de las mismas vigas es de 5,98 cm. (1,75 cm. de la primera fase más 4,23 cm. de la segunda). Esta flecha, que en términos generales ya resulta "bastante" satisfactoria (1/648 referida a una luz de 38,75 m.), lo es más si se tiene en cuenta que, del total mencionado de 5,98 cm., tan solo unos 2,00 cm. corresponden a la flecha elástica debida a la actuación de las sobrecargas (L/1.940). Aún contando con los conceptos actualmente empleados al efecto de limitar esta magnitud, y más particularmente al de "flecha activa" -la que es susceptible de causar daños en la construcción-, la situación resultante sólo puede calificarse de excelente.

8

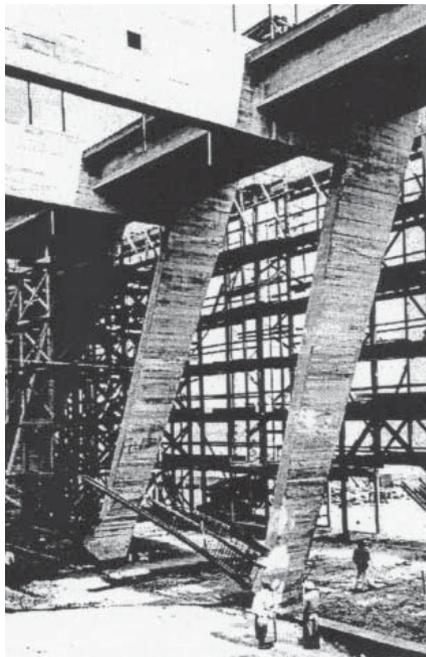
En cambio, es mucho menos reconfortante la situación que se detecta en el caso del forjado de la primera planta; y lo es por un doble motivo:

- En primer lugar, porque la flecha total resultante para este forjado es aún algo excesiva. Concretamente, el valor obtenido de 6,7 cm. representaría del orden de 1/265 de la luz. Incluso teniendo en cuenta que casi el 60% de dicha flecha corresponde a las cargas permanentes, así como el efecto beneficioso del importante esfuerzo axial al que queda sometida la barra (del orden de 110 T.) y que daría lugar a que ésta se comportase como un "semipretensado" (con la mejora de su comportamiento diferido inherente a esta situación), el equivalente al concepto de flecha activa podría cifrarse en este caso en el entorno de L/400, que aún debe considerarse algo excesivo.

- Por otra parte, el diagrama de flectores no muestra una excesiva correlación con la geometría de la barra, dado que los valores resultantes para la sección central son sensiblemente superiores



9



10

a los de las secciones extremas, donde prácticamente se anulan.

A fin de dar una última "vuelta de tuerca", se ha procedido a revisar esta segunda fase del proceso de construcción, introduciendo un esfuerzo de pretensado en la riostra de cimentación de 150 T. (aunque según Matta y Carneiro & Valle, en realidad se aplicaron 200 T., prácticamente 50 T. de ellas se absorben en la primera fase).

Los resultados obtenidos son los que se recogen en los dos gráficos de la página 74. El primero de ellos corresponde a la nueva deformada, y el segundo a la distribución de momentos flectores.

De ellos cabe destacar que, mientras las citadas leyes de momentos flectores varían de forma casi imperceptible, la flecha resultante para la jácena del primer piso se reduce prácticamente a las dos terceras partes (44,67 mm. frente a 66,99 mm.). Evidentemente, esta deformación solo puede calificarse como de todo punto admisible.

Llegados a este punto, se juzga ya innecesario continuar profundizando en el análisis.

Sin duda, es cierto que aún queda algún interrogante por desvelar (la citada discordancia entre las leyes de flectores y la geometría del forjado del primer piso). Tampoco lo es menos que, paradójicamente, dicha discordancia no se producía en la primera de las aproximaciones efectuadas; en ella, el diagrama de flectores y la geometría sí mostraban un paralelismo absoluto.

Si lo que se trataba de juzgar era el rigor del planteo estructural en el proyecto del MAM, parece que éste queda suficientemente fundamentado.

La discrepancia observada puede deberse perfectamente a las limitaciones de la época (cabe recordar que, 50 años atrás, el cálculo se realizaba de forma prácticamente manual), a divergencias entre la modelización del entramado realizada por el equipo de Reidy y la efec-

8. Esquema de control del proceso de descimbrado de uno de los pórticos principales.

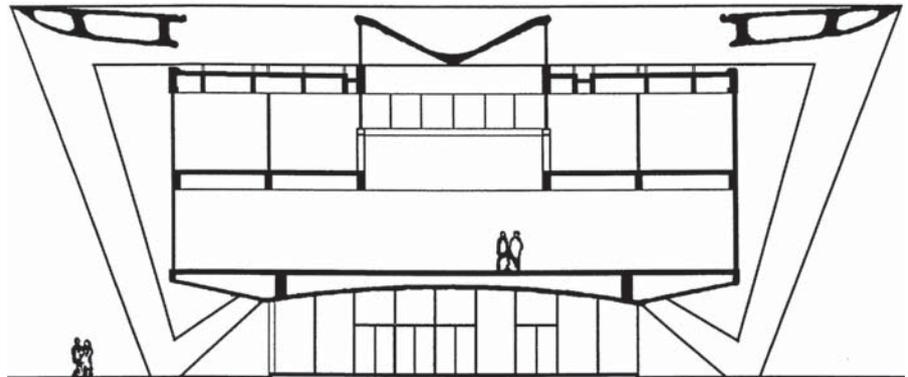
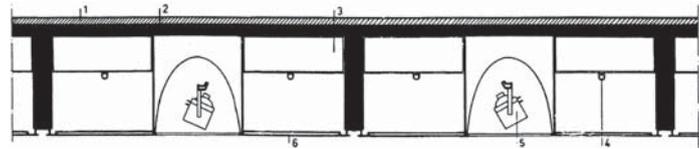
9 y 10.

Imágenes del inicio de la construcción de los pórticos principales (enero 1959)

11. Detalle de la cobertura del bloque de exposiciones:

1. Pavimento
2. Losa de hormigón armado
3. Sistema de aire acondicionado
4. Tubos fluorescentes
5. Reflector
6. Placas de vinilo

12. Sección transversal por la Biblioteca del Bloque de Exposiciones



11

12

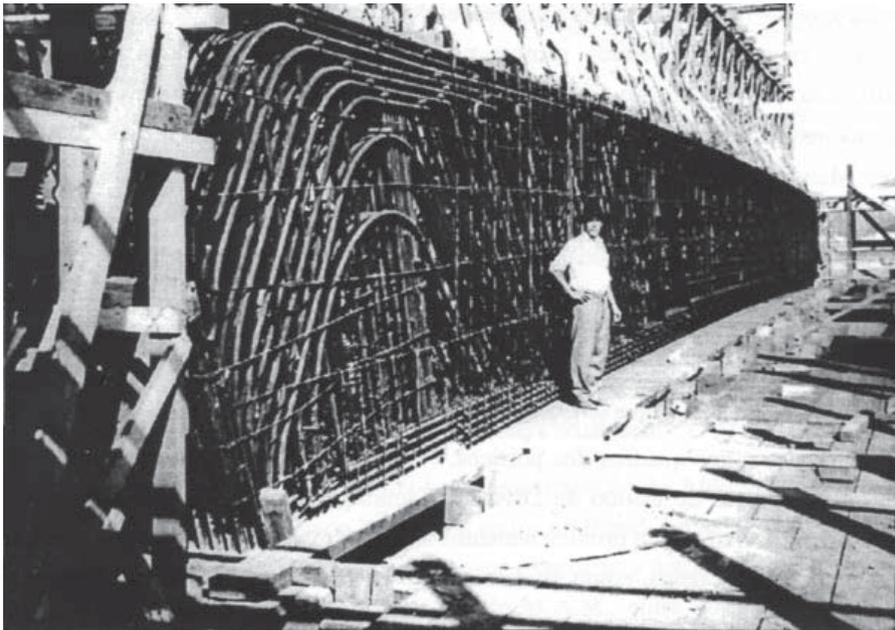
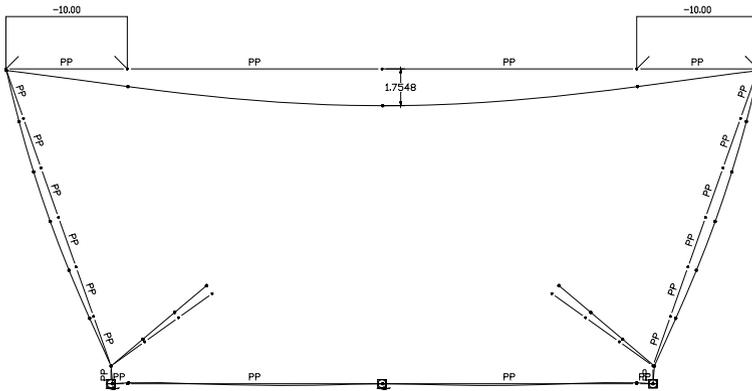
tuada para el desarrollo de este trabajo (sin prejuizar de antemano cuál de ellas podía resultar más acertada), o simplemente al desconocimiento o a la mala interpretación de algún dato concreto (cabe insistir, una vez más, en lo precario de la información de que se ha dispuesto que, salvo por el texto de Matta y Carneiro & Valle reiteradamente aludido, solo aporta una aproximación puramente cualitativa al diseño estructural).

En cualquier caso, y dejando al margen estas nimiedades, la conclusión irrefutable que se extrae de todo este periplo es la certeza sobre el rigor técnico empleado en el proyecto de la estructura del MAM, cuyos componentes no siguen formalizaciones derivadas únicamente de determinados requerimientos funcionales, espaciales, climáticos o ambientales en general, sino que dichos requerimientos se integran con los que son propios del diseño estructural, tales como los de resistencia, estabilidad y rigidez, para conformar un entramado que trasciende el concepto de "formar parte" de la construcción, para convertirse en esencia de la misma. No tan solo le es útil, sino que le confiere sentido y determina su razón de ser.

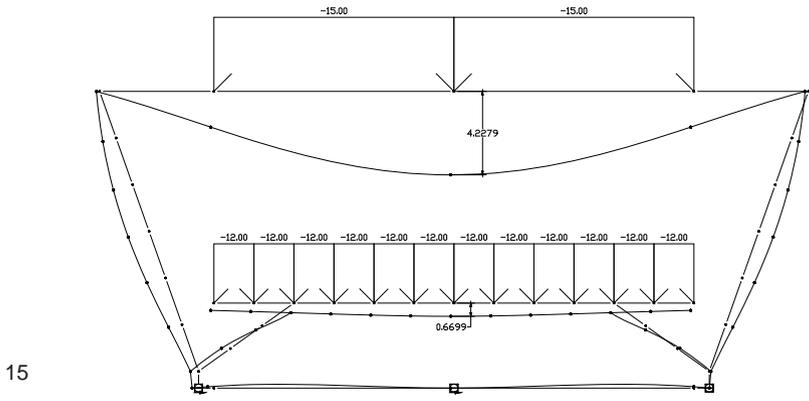
Bajo esta perspectiva cabe entender que Reidy hiciera uso con cierto desenfado de algunos recursos que en aquella época eran relativamente poco concebibles para una obra de edificación, tales como los hormigones de elevadísima resistencia o el postesado.

En esta obra, y a diferencia de algunos execrables ejemplos del movimiento que hoy conocemos como "High-Tech", lo que plantea Reidy es el uso de la tecnología al servicio del ser humano -en este caso, de una de sus actividades más vernáculas, como es la edificación- como alternativa al alarde tecnológico en sí mismo. La serenidad que transmite el edificio desde su óptica más amplia es el fruto de una aproximación a la técnica como instrumento.

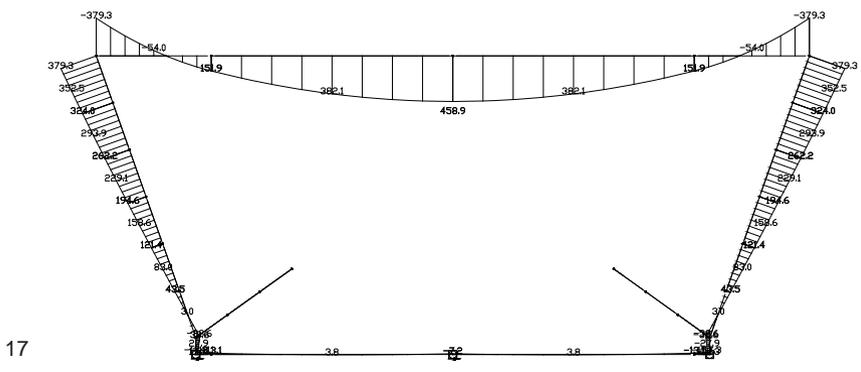
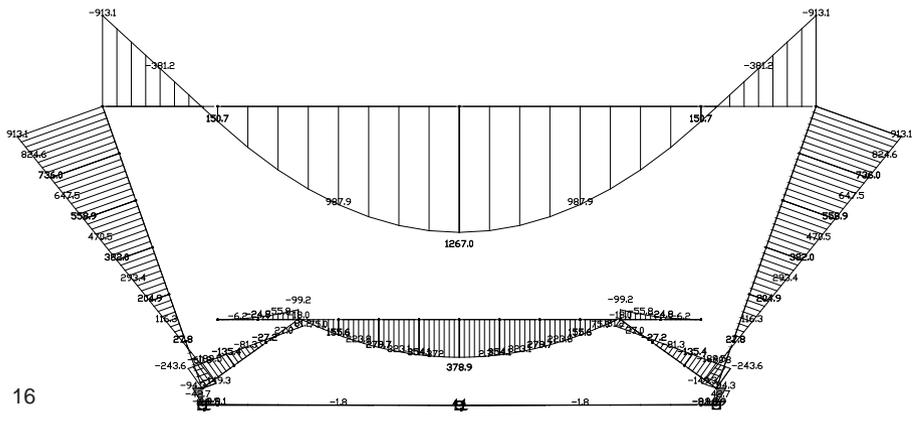
13

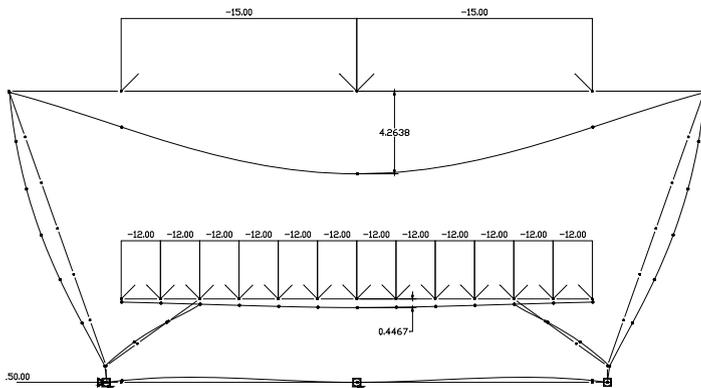


14

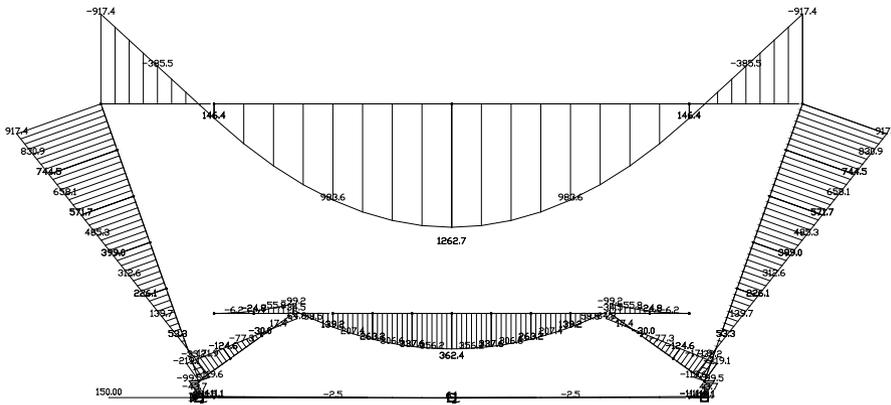


- 13. Deformaciones correspondientes a la primera fase de descimbrado
- 14. Vista de la armadura de los pórticos del bloque de exposiciones.
- 15. Acciones y deformaciones correspondientes a la situación final (aditivos a la primera fase)
- 16. Momentos flectores correspondientes a la situación final (aditivos a la primera fase)
- 17. Momentos flectores correspondientes al primer descimbrado (primera fase de la construcción)





18



19

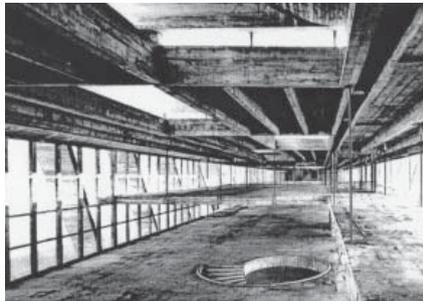
Notas:

1. Eline Maria Moura Pereira Caixeta, *Affonso Eduardo Reidy. O poeta constructor*. Tesis doctoral, ETSAB, Barcelona, 1999.

2. Se trata de la referencia nº 104 de la mencionada tesis, que recoge ciertas descripciones técnicas de la estructura del Bloque de Exposiciones atribuidas a Matta (1959) y Carneiro & Valle (1959), y que se reproduce íntegramente a continuación. "O bloco de exposições era constituído por 14 pórticos de concreto armado. Cada um deles era duplo e biarticulado, formado por um quadro principal e outro secundário. O quadro principal é constituído de duas pernas inclinadas



20



21

para fora e uma viga horizontal de 41 m. de comprimento, na qual se penduram as lajes da cobertura e do 2º pavimento. O quadro secundário, com duas pernas para dentro, sustenta a laje do primeiro pavimento. Os dois quadros tem apoio comum por meio de articulações formadas por placas de chumbo, sobre blocos de concreto armado sustentados por estacas Franki de 23 m. de comprimento. Os blocos de apoio de cada quadro duplo são ligados por um tirante de concreto protendido, que absorve o empuxo horizontal de 200 T., proveniente do quadro secundário. O contaventamento entre os quadros é constituído na base por uma viga longitudinal robusta de 0,60 x 1,20 e, no topo, por marquises de laje dupla, nervurada, com comprimento de

8,00 m. e, ainda na parte central, pelas lajes inclinadas dos lanternins. O quadro principal apresenta as seguintes dimensões: 16,93 m. de altura, acima da face superior dos tirantes; seção de apoio igual a 1,20 x 0,40; altura da viga igual a 2,75 m.; espessura na face inferior da viga igual a 0,57 e na face inferior igual a 0,60 m. A vao teórico da viga superior é de 38,75 m. e a distância entre as articulações na base dos montantes de 26,90 m. O valor do momento máximo positivo na viga mestra dos quadros era da ordem de 2.000 mxT e a tensão de compressão do concreto de 400 kg/cm². A dosagem do concreto –realizada para uma tensão média de 400 kg/cm²- foi, por primeira vez, elaborada pelo Instituto Nacional de Tecnologia".

18. Acciones y deformaciones correspondientes a la hipótesis de postesado de la riostra
19. Momentos flectores correspondientes a la hipótesis de postesado de la riostra
- 20 y 21
Vista interior del primer piso del Bloque de Exposiciones durante su construcción
22. Vista exterior durante la construcción

