

Las Torres "Petronas" en la ciudad de Kuala Lumpur, Malasia, son edificios gemelos de 95 pisos de altura. Con sus 452 m, son los edificios más altos del mundo. El enfoque estructural para las torres combinó los aspectos más favorables de la construcción en hormigón y en acero.

Se usó hormigón estructural en un núcleo central de dimensión y espesor de pared variables, en 16 columnas y vigas anulares perimetrales de cada torre y en 12 columnas perimetrales y vigas anulares de altura variable del "Area Inferior Adosada". Aunque no tan visible como los elementos especiales, el hormigón de alta desempeño (HAD) resultó crítico para la velocidad y economía de la construcción de las "Petronas".

## **BENEFICIOS DEL HAD**

El hormigón en general, y el HAD en particular, resultó esencial para el éxito del proyecto. Los beneficios de la construcción con HAD incluyen mucha masa, mucho amortiguamiento elevada rigidez lateral, conexiones sencillas y dimensiones reducidas de los elementos.

**Rigidez de la Estructura** - Las estructuras de hormigón colado "in situ" presentan secciones más masivas que los elementos de acero con resistencia de diseño equivalentes, por lo que las estructuras dimensionadas por resistencia tienen a menudo suficiente rigidez para satisfacer también los criterios de deflexión lateral. Las estructuras de acero requieren frecuentemente, para cumplir con los criterios de deflexión, material adicional aparte del necesario por resistencia.

**Elementos de Forma Inusual** - El hormigón proporcionó, económicamente, secciones críticas no-prismáticas para este proyecto. En vez de los espaciamientos de 4 m a 6 m en las columnas perimetrales, habituales en torres de hormigón de gran altura, el diseño estructural de las "Petronas" proporcionó un perímetro mucho más abierto. Se logró un espaciamiento entre columnas de 8,2 m a 9,8 m, que brindó espacios libres de 6,7 m a 8,3 m y áreas de piso que se extienden más allá de las vigas anulares. Las vigas anulares encorvadas maximizan la rigidez lateral de la estructura y encajan dentro del cielorraso sandwich, al tiempo que brindan espacio, en el centro de la luz, para la iluminación en el cielorraso y el paso de conductos (Fig. 2).

**Sencillez Constructiva** -- El hormigón colado "in situ" tiene conexiones sencillas y reducidos requisitos de izado. Las vigas anulares de las "Petronas" se encuentran con columnas a ángulos variables, con columnas que retroceden y con columnas inclinadas a ángulos variables (Figs. 3 y 4). Las conexiones de elementos estructurales de acero para estas condiciones diferentes constituirían, como mínimo, un desafío; en cambio, la construcción en hormigón colado monolítico las resuelve con facilidad. Además, los elementos de hormigón más masivos fueron llenados usando grúas livianas, baldes y bombas.

**Reducción de las Dimensiones de los Elementos** -- Para torres de gran altura, las dimensiones de los elementos verticales se agrandan rápidamente si la resistencia del material no aumenta hacia los pisos inferiores. Usando mezclas de hormigón con resistencia cúbica mínima de 80 MPa a los 56 días, las columnas de la torre resultaron de 2,4 m de diámetro en los niveles inferiores y las paredes del núcleo de 750 mm de espesor. Si la resistencia del hormigón se hubiera limitado a 40, 50 ó 60 MPa, las dimensiones de los elementos habrían resultado inaceptables, tanto del punto de vista estético como del inmobiliario.

**Deflexiones Reducidas a Corto y Largo Plazo** -- El HAD tiene gran rigidez y, potencialmente, poca retracción y fluencia lenta. El hormigón Clase C-80 tiene un módulo de elasticidad 36% mayor que un C-40, de modo que si las dimensiones de los elementos son reducidas a la mitad, sus rigideces disminuyen sólo en 1/3. Esto constituye una ventaja significativa sobre el acero de alta resistencia.

## **SELECCION DE LOS TIPOS DE HORMIGON**

**Clases de Hormigón Utilizadas** - El equipo de proyecto, el propietario y el promotor inmobiliario se dieron cuenta de que, por las razones expuestas más arriba, un proyecto "Petronas" exitoso iba a requerir de HAD. Si bien los proveedores de hormigón habían estado experimentando con mezclas de HAD, ninguno lo había suministrado comercialmente en tal escala de producción. Para simplificar el diseño y la adquisición, se especificaron seis dosificaciones estándar, que fueron luego refinadas mediante pastones de prueba de relación agua/cemento (a/c) variable y por el moldeo de elementos de prueba a gran escala. Todas las mezclas eran adecuadas para la colocación por bombeo cuando se les agregaba la dosis correcta de "superfluidificante", pero también se las podía colocar con otros medios (balde, carritos, etc.). La Tabla 1 presenta las características más significativas de las mezclas más usadas.

**Clase C-80** -- La clase más alta de hormigón seleccionada para este proyecto tenía una resistencia cúbica especificada de 80 MPa a 56 días de edad. Los ensayos paralelos de resistencia, medida durante la construcción en cilindros y cubos, mostraron que los 80 MPa en cubos equivalía a 70 MPa en cilindros. La edad de diseño de 56 días se adoptó en consideración al lento desarrollo de resistencia aportado por la ceniza volante y porque la carga completa no se aplicaría antes de varios meses.

La Clase C-80 se usó para las columnas, las paredes del núcleo y las vigas anulares de los niveles inferiores, para que tuvieran dimensiones razonables. Se analizó el agregado de armadura para reducir aún más dichas dimensiones pero, para elementos grandes, la armadura adicional por encima del 1 % mínimo reglamentario hubiera creado una congestión inaceptable. Una relación a/c extremadamente baja y la inclusión de microsílíce brindaron la alta resistencia y módulo de elasticidad deseados. Se incluyó un aditivo reductor de agua de alto rango o "superfluidificante"

para alcanzar la consistencia deseada de 200 mm de asentamiento en el punto de entrega. Se decidió la inclusión de un cemento puzolánico con ceniza volante para reducir el calor de hidratación inicial. La necesidad de esta medida se identificó en los estudios de fisuración térmica superficial en las columnas de prueba a gran escala.

**Clase C-60** -- Para el diseño, el hormigón de resistencia cúbica 60 MPa a 56 días, fue tomado como de  $f'c = 49$  MPa (cilíndrica equivalente).

Esta Clase se usó en los niveles intermedios de las columnas de la torre y de las paredes del núcleo. Se lo usó también para la losa de fundación de la torre, como transición entre el hormigón C-45 y el C-80 de las columnas. Existió preocupación por el calor de hidratación de este hormigón, dado su uso en la losa de fundación de 4,5 m de espesor. En ese clima tropical la losa de fundación fue recubierta de placas de espuma aislante durante un mes luego del llenado, para controlar los gradientes de temperatura y minimizar la fisuración térmica.

**Clase C-45** -- El hormigón con resistencia cúbica de 45 MPa a 56 días se usó para los pilotes de la fundación, para permitir un buen balance entre la resistencia y la trabajabilidad requerida para la colocación con tubería sumergida.

**Clase C-40** -- La resistencia cúbica de 40 MPa a 28 días fue tomada como  $f'c = 32$  MPa para el diseño aunque podría haberse aceptado hasta 35 MPa. La edad menor se justifica porque la carga completa ocurría pronto después del moldeo de los pisos superiores.

**Clase C-35** -- La mezcla usada como relleno del tablero compuesto metálico se dosificó para ser bombeable y fácil de terminar, con una  $f'c$  de diseño de 28 MPa. El desarrollo rápido de resistencia es también ventajoso para permitir la re-entrada rápida de los operarios en el área.

**Cambios en los Tipos de Hormigón** - Debido a que las clases más altas de hormigón tienen un precio unitario mayor, el consultor del propietario estudió el nivel apropiado de cambio entre Tipos. Como resultado, las columnas y paredes del núcleo de los pisos superiores se diseñaron para usar clases de hormigón más bajas antes que reducir sus dimensiones. El resultado es un mayor volumen total de hormigón pero un menor costo total del mismo (Fig. 5). El perímetro de la torre, el A.I.A. y el núcleo podrían haber tenido Clases diferentes en el mismo piso, pero para evitar confusiones durante el llenado, se procuró usar el mismo Tipo para elementos adyacentes.

## PROVISION DEL HORMIGON

El Proyecto de Desarrollo del Noroeste, que incluye las Torres Gemelas "Petronas", está ubicado en el centro de Kuala Lumpur, con condiciones típicas de tránsito urbano alrededor del emplazamiento. Se concluyó que la provisión de hormigón elaborado desde plantas remotas, mediante camiones mezcladores, incurriría en el riesgo del rechazo de numerosos pastones debido a excesivas demoras, con el riesgo asociado de retardos en la construcción y a la indeseable formación de juntas frías. También hubiera resultado difícil verificar la calidad del hormigón entre planta y obra, lo que podría resultar crítico para un HAD satisfactorio. El propietario entendió estas preocupaciones y exigió que el hormigón fuera suministrado desde plantas ubicadas en el emplazamiento de la obra. Para los primeros trabajos de fundación, el hormigón de los muros diafragma, pilotes y losas de fundación de la torre, fue suministrado por el subcontratista del contrato de fundación. Antes de proceder con el trabajo en las torres con el HAD, el propietario licitó el suministro de hormigón y contrató una única compañía de hormigón elaborado para establecer una planta "in situ", con modernos controles computarizados de pesada, almacenamiento de material y mezclas de hormigón normalizadas. Afortunadamente, el sitio era suficientemente amplio para proveer el espacio necesario.

## **PROGRAMA DE ENSAYOS Y SEGUIMIENTO**

Dado que el comportamiento a largo plazo de las columnas y núcleo afecta las juntas de fachada, la nivelación de los pisos y otros aspectos del uso del edificio, se estableció un programa de ensayos cuidadoso.

**Fórmulas de Predicción** -- En ausencia de resultados de laboratorio al inicio de la construcción, se desarrolló un programa de computación para pronosticar la fluencia y la retracción. El programa rastreó el acortamiento, piso por piso, del núcleo y columnas de la torre y del A.I.A., incluyendo los efectos de cargas incrementales. Los resultados se utilizaron para establecer ajustes en la construcción o "contraflechas" para compensar el acortamiento de piso a piso y los movimientos diferenciales verticales núcleo-perímetro.

El proyectista de la fachada exigió que las alturas de piso a piso no se acortaran nunca a menos de la dimensión nominal de diseño. Por eso, los niveles del núcleo se incrementaron entre 6 mm y 7,5 mm por piso. Los acortamientos diferenciales entre el núcleo y las columnas y entre las columnas de la torre y del A.I.A., son debidas a diferencias en tensiones, tiempos de construcción, cuantías de armadura y relaciones volumen -superficie. El contratista fue orientado en base a las estimaciones previas del comportamiento del hormigón. Los niveles de las columnas de la torre se establecieron piso a piso mediante una marca en el núcleo en cada piso. Las columnas fueron proyectadas ligeramente más altas que el núcleo, de modo de equilibrar las diferencias con el tiempo. Vale reiterar que se evitaron cambios bruscos en esa "contraflecha" para minimizar cambios en las juntas de los paneles de fachada. El A.I.A. se definió usando marcas en las columnas de la torre y se lo proyectó ligeramente más alto que las columnas de la torre, en base al programa de construcción anticipado.

**Ensayos de Laboratorio** --Se ensayaron muestras de hormigones Clase 80, 60 y 40, en tres laboratorios diferentes, para medir resistencia, módulo de elasticidad, fluencia y retracción. Algunos ensayos de fluencia y retracción duraron más de un año. Los ensayos de fluencia se efectuaron con distintos niveles de tensión para verificar la linealidad de la respuesta. También se efectuaron ensayos de fluencia a distintas edades para calibrar la función edad de carga en el programa desarrollado. Se ensayaron probetas selladas y sin sellar, para diferenciar el fluencia "básico" del fluencia "por secado".

**Mediciones en Obra** -- Cada diez pisos se efectuaron replanteos de las torres, repetidas luego de que se construyeran los diez pisos siguientes. El replanteo mostraba el comportamiento tridimensional del edificio.

**Resultados de Resistencia** -- Las resistencias del hormigón estuvieron un 25% por encima de las especificaciones, con coeficientes de variación del 10% (Fig. 6 para Clase C-80). Las otras clases siguieron un patrón similar.

**Resultados de Módulos de Elasticidad** -- Los promedios de ensayo de módulo E mostraron una buena concordancia con las predicciones de la fórmula del ACI. Los valores del módulo E mostraron un ligero aumento con la edad del hormigón, pero la ganancia fue mucho menor que para la resistencia a compresión.

**Comportamiento a Largo Plazo** -Las predicciones por computadora del comportamiento a largo plazo, al comienzo de la construcción, usaron fórmulas que relacionaban la composición del hormigón con las propiedades físicas, basadas en ajuste de curvas a numerosos ensayos previos de hormigones convencionales. Una vez que se dispuso de datos de laboratorio significativos, se calibraron las fórmulas para obtener un excelente ajuste a los datos.

Los ensayos mostraron que la predicción de la retracción, usando fórmulas estándar, no es sustituta de los ensayos de muestras reales. La retracción pronosticada subestimó los valores medidos en 38% y 9% para las Clases C-80 y C-60, pero lo sobrestimó en 43% para la Clase C-40. Una vez calibrada, la fórmula se ajusta adecuadamente a los datos de laboratorio.

**Correlación entre Fórmulas, Laboratorio y Replanteos** -- Los pronósticos por computadora sobrestimaron ligeramente los acortamientos a corta edad, por lo que las "contraflechas" usadas son holgadas para cubrir los acortamientos ahora anticipados. Con los ajustes en las fórmulas, discutidos más arriba y, usando una humedad relativa ambiente de 80% (antes de que opere el aire acondicionado), los pronósticos y los replanteos muestran un buen acuerdo.

## **CONCLUSIONES**

El HAD en el núcleo central, en las columnas perimetrales, en las vigas anulares perimetrales y en los voladizos de las Torres "Petronas" en Kuala Lumpur, fue un elemento esencial en el diseño exitoso de este edificio superelevado.

El HAD permitió que los elementos verticales, núcleo y columnas, fueran de dimensión razonable y económica, ahorrando espacio rentable. Permitted la construcción usando equipos relativamente livianos y simplificó las conexiones en juntas de geometría difícil. Y el HAD es adecuado para sistemas estructurales resistentes al viento gracias a su rigidez intrínseca, cuando se los dimensiona por resistencia; a su mayor masa que conduce a períodos de construcción más largos y confortables y a su amortiguamiento interno propio que reduce la respuesta del edificio a las ráfagas de viento.