HPCC en la Torre-e del Brasil*

PAULO HELENE Y CARINE HARTMANN

El concreto coloreado de alto comportamiento (HPCC) ofrece resistencia, columnas más delgadas, mayor espacio útil y una vista estética.

Salido directamente del laboratorio de investigación, la utilización de dicho concreto en la Torre-e representa para Brasil su primera experiencia en ese tipo de concreto, que tuvo como objetivos facilitar la colocación del concreto, y maximizar el espacio ocupado para con ello incrementar la productividad. Simultáneamente, al dar color a las columnas de concreto se lograron los efectos arquitectónicos deseados tanto en la estructura como en el estacionamiento cubierto.

La Torre-e, en Sao Paulo, con sus 42 pisos, 52 mil m^2 de superficie útil y 162 m de altura es uno de los cinco edificios más altos de Brasil, por lo que puede considerarse

Fig. 1: Representación arquitectónica de la Torre-e

Brasil es uno de los países más avanzados en la tecnología del concreto en Sudamérica, tiene una larga tradición de la construcción de edificios altos de más de 100 m de altura, que se inició en 1929, hace 74 años, cuando los ingenieros brasileños diseñaron el Edificio Martinelli, considerado, en su momento, como la torre de concreto más alta del mundo, con una altura de 106 metros sobre el nivel de las calles de Sao Paulo. Por otra parte, en l960, se inauguró la torre de concreto del Palacio Zarzur Kogan, que con 189 m de altura también fue considerado el edificio de oficinas más alto en el país, en su momento.

como una estructura de gran altura o "rascacielos", según la clasificación internacional adoptada por el Consejo Sobre Edificios Altos y Habitat Urbano. Por otra parte, este moderno edificio de oficinas (Fig. 1), ofrece estacionamiento para 800 automóviles, dos excelentes restauran-tes, un centro para convenciones y negocios, una alberca semi-olímpica y un centro de acondicionamiento físico, además de un heliopuerto ubicado en el punto más alto, en tanto por su sistema de aire acondicionado y disposiciones para ahorro de energía y de agua se puede definir como un "edificio inteligente".

REQUISITOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En la Torre-e se empleó concreto coloreado de alto comportamiento (HPCC, High-Performance-Colored-Concrete), de una $f'c$=125 MPa. El concreto utilizado en las cinco columnas para los primeros siete pisos de la estructura se dosificó en una planta de concreto comercial, se mezcló en el camión en camino al sitio de la obra a través del pesado tráfico urbano, y se colocó entre 40 y 60 minutos después de dejar la planta.

La torre está soportada sobre una losa de cimentación de concreto (Fig. 2), de 17 m de ancho x 28 m de largo y 2.8 m de profundidad, colada con concreto de $f'c$=35 MPa. Para controlar el calor de hidratación se mezcló hielo en el agua con lo que se lograron temperaturas de colocación de aproximadamente 15 °C, comparadas con la temperatura ambiente de 25 °C.

Cada una de las cinco columnas principales sobre los cimientos soportan aproximadamente 2 500 toneladas de carga y tienen menos de 0.42 m² de sección transversal para maximizar la capacidad de ocupación y el espacio vehicular del estacionamiento en los niveles más bajos.

Con el fin de satisfacer estos límites dimensionales, el equipo formado por Munir Abbud, propietario; Jorge Batlouni, ingeniero por el contratista, Tecnum; Ricardo França, ingeniero estructural; Eliron Souto, por la compañía de premezclado, Engemix; y uno de los autores, Paulo Helene, aceptaron el reto de diseñar un concreto apropiado de alto comportamiento.

Fig. 2: El bloque de cimentación de la Torre-e requirió la adición de hielo al agua de mezclado para ayudar a controlar el calor de hidratación

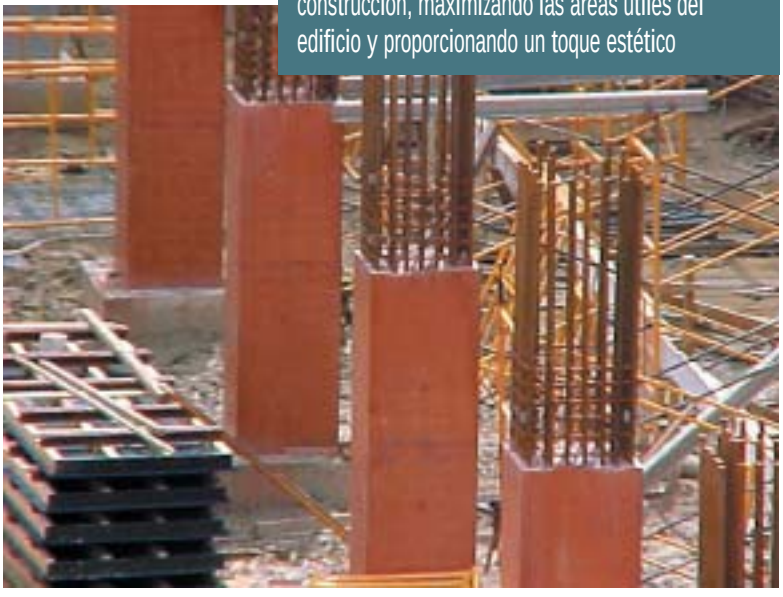

Fig. 3: La utilización de columnas de concreto coloreado de alto comportamiento (alta resistencia) (HPCC), permite la esbeltez en el diseño y la construcción, maximizando las áreas útiles del edificio y proporcionando un toque estético

Tabla 1 **Proporciones de la mezcla de concreto coloreado de alto comportamiento usado en las columnas de la Torre-e**

Materiales	Proporciones de mezclas, Kg/m³	Observación
Cemento	450 cemento+163 escoria Tipo III+escoria	ASTM C 150
Escoria	163	-
Humo de sílice o metacaolín	93	-
Agregado fino	550	Cuarzo
Agregado grueso	1027	Basalto
Pigmento	25	Óxido de hierro
Reductor de agua de alto rango	6.2	Policarboxilato
Auto-retardante	3.2	Ácido carboxílico
Agua	135	-
Relación agua-material cementante	0.19	-

El equipo buscó el concreto de la más alta resistencia jamás especificado en Brasil para una estructura de concreto, el cual tuvo que ser despachado por camiones mezcladores desde una planta nacional de concreto en Sao Paulo. El reto se hizo más interesante cuando los arquitectos del proyecto, Aflalo y Gasperini, decidieron agregar color a las columnas de concreto de alto comportamiento, alcanzando altitudes con concreto coloreado que marcaban un récord.

ASPECTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS

Los diseñadores eligieron concreto de alta resistencia como una alternativa dictada por cuestiones técnicas y económicas que gobernaban la configuración de la Torre–e, y la necesidad crítica para reducir las dimensiones de las columnas en los primeros cinco pisos (Fig. 3). Se utilizó concreto coloreado de alta resistencia en las columnas entre los pisos, cuatro de las cuales están localizados en cuatro pisos de estacionamiento subterráneo y en columnas alargadas dentro del piso principal de entrada y dos pisos adicionales.

En total, el uso de HPCC dio como resultado 53% de ahorro en el volumen de concreto, y 3% en el costo total. El material también permitía espacios para cuatro espacios adicionales para autos en cada uno de los cuatro pisos del estacionamiento, agregando con ello mayores ingresos potenciales en el edificio.

MATERIALES DEL CONCRETO

Al seleccionar los materiales, tuvieron que considerarse los siguientes criterios: calidad del cemento Portland y el agregado; aditivos para cemento y compatibilidad entre los aditivos; pertinencia del pigmento para proporcionar un color durable a largo plazo y que no inhibiera la resistencia del concreto; y la disponibilidad y el costo.

Todos los materiales de concreto fueron traídos de Sao Paulo y sus alrededores. El agregado grueso local consistía de un basalto resistente y sano que tenía un tamaño nominal máximo de las partículas de 19 mm, densidad de 3.02 kg/m², y un módulo de finura de 6.91. La arena de cuarzo sirvió como agregado fino, con tamaño nominal máximo de 2.4 mm, densidad de 2.67 kg/m², y módulo de finura de 2.04. El cemento Portland utilizado es brasileño, del Tipo V, de alta resistencia inicial, similar al Tipo III de la ASTM C 150, con la adición de aproximadamente 23% de escoria de alto horno, 13% de humo de sílice o 15% de metacaolín, 4% de pigmento rojo inorgánico para el color, 1% de reductor de agua de alto rango en base de policarboxilato, y un aditivo al 0.45% para el control de la hidratación y la retardación del fraguado. La naturaleza de la mezcla HPCC permitió una colocación de casi tres horas altamente productivas para todos las cinco columnas coloreadas dentro de un piso.

ELIGIENDO EL COLOR

El arquitecto escogió el color por razones estéticas, pero el contratista también utilizó color para la identificación y diferenciación de HPCC cuando llegaba al sitio de la construcción para evitar confusión entre HPCC y el concreto convencional. El óxido de hierro mineral forma la base del color rojo del HPCC y se provee como un polvo seco y se agrega en la planta de dosificación.

PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA DEL HPCC

Los experimentos de laboratorio requirieron un total de 1.5 m^3 de HPCC en comparación con unos 150 m^3 en la construcción de estas 35 columnas de alta resistencia. Se consideraron muchos factores en el proporcionamiento de la mezcla de concreto, tales como resistencia temprana y final, elevación de la temperatura, alta trabajabilidad, proporcionamiento del mortero, y pérdida de revenimiento. Para satisfacer todos estos requisitos, tuvieron que desarrollarse un cierto número de proporciones de la mezcla de concreto y se investigaron sus respectivas resistencias y módulos de elasticidad para ayudar a seleccionar el más apropiado. Un revenimiento de entre 140 y 200 mm probó ser aceptable para la trabajabilidad en el campo (Fig. 4). Los técnicos colaron columnas de prueba tanto en el laboratorio como en el campo durante los tres meses previos a la colocación efectiva.

En la fecha de este escrito, la estructura de concreto de la Torre–e ha sido completada y continúan los trabajos de acabado. El color está limitado a los pisos inferiores, tal como se describió, con resistencias de columnas en los niveles más bajos reduciéndose sucesivamente hasta alcanzar 60 MPa y 40 MPa de acuerdo con la localización, en los últimos 10 pisos. La Tabla 1 enlista las proporciones de la mezcla usadas en las columnas de concreto coloreado.

COLOCACIÓN Y CURADO DE HPCC

El HPCC fue mezclado en el camión desde la planta hasta el sitio de la obra, continuando el mezclado en el sitio por un mínimo de ocho minutos antes de la prueba de revenimiento y de la colocación. Los trabajadores colocaron el HPCC en las cimbras por medio de grúas y cucharones o tolvas de volteo (Fig. 5), compactando el concreto con vibradores de inmersión. Se quitaron las cimbras después de 72 a 96 horas para exponer la superficie de concreto limpio y parejo –a pesar del cerrado espaciamiento de las varillas de refuerzo-.Además, el HPCC exhibió buena cohesión, permitiendo el colado por gravedad libre en las columnas desde la parte superior del refuerzo de las columnas en un piso.

Las columnas alcanzaron una altura desde el piso hasta el techo de 5.5 m en el piso principal del edificio. Las cuadrillas colaron las partes superiores de las columnas en las uniones de las losas y las vigas al día subsecuente. La resistencia del concreto en la losa y la viga es de 40 MPa, en cada una de estas secciones curadas manteniendo la cimbra en su lugar por un mínimo de 72 horas. Fue necesario mantener el curado hasta que la resistencia a compresión del HPCC excedió 15 MPa. El HPCC tenía una relación de agua-material cementante (a/*mc)* de 0.19, y alcanzó una resistencia a compresión superior a los 50 MPa cuando la cimbra fue removida, haciendo innecesario después de esto el curado con agua.

Fig. 4: Un revenimiento de entre 140 y 200 mm probó ser aceptable para lograr un HPCC trabajable

Fig. 5: Una grúa y un cucharón o tolva de volteo colocan el HPCC dentro de las cimbras de las columnas

ANUNCIO SIKA

ANUNCIO SIKA

Tabla 2 **Algunas propiedades del HPCC comparadas con el concreto estructural más convencional de 30 MPa**

Propiedades		HPCC, *f'c*=125 MPa	Concreto normal, *f'c*=30 MPa
Resistencia a compresión (ASTM C 39)	7 días 28 días 63 días 91 días	111 MPa 125 MPa 141 MPa 155 MPa	18 MPa 36 MPa 41 MPa 44 MPa
Módulo elástico (ASTM C 469)	28 días	47 GPa	33 GPa
Resistencia a flexión (ASTM C 496)	28 días	10.0 MPa	3.3 MPa
Profundidad de carbonatación a 28 + 63 días a 25 °C, RH 65%, CO2 5%	91 días	0	28 mm
Absorción de agua, densidad, y volumen de poros (ASTM C 642)	Absorción de agua	0.35%	5.1%
	Absorción de agua después de hervir	0.41%	5.8%
	Volumen de poros	1.0%	13.2%
	Volumen de poros después de hervir	1.1%	15.1%
	Densidad	2500 kg/m³	2320 kg/m³
Absorción capilar (ASTM C 1403)	Absorción capilar después de 72 h	1.2 kg/m³	12.0 kg/m³
	Ascención máxima interna del agua después de 72 h	0 mm	99.0 mm
Penetración de iones de cloruro (ASTM C 1202)		43 Coulombs	8000 Coulombs
Velocidad ultrasónica de pulsación (ASTM C 597)		4950 m/s	3250 m/s
Prueba de Hammer (ASTM C 805)		52	27

CONTROL DEL HPCC

Para controlar la calidad del HPCC, las investigaciones normales incluyeron pruebas de revenimiento, y se colaron especímenes cilíndricos (100x200 mm y 150x300 mm) y especímenes cúbicos (150 mm de lado) para la resistencia a compresión, y también se hicieron observaciones para el módulo de elasticidad y la temperatura

(Fig. 6). La trabajabilidad del HPCC, determinada por la prueba de revenimiento, no fue un factor decisivo, pues el revenimiento del concreto podía variar desde 140 hasta 200 mm y también fue influenciado por la temperatura ambiental y la humedad relativa.

Los investigadores colaron especímenes de prueba cuando el concreto estaba siendo colocado en la estructura, y el concreto de muestreo estaba siendo directamente tomado del extremo de descarga de la tolva del camión. Cada camión mezclador de concreto fue cargado únicamente a la mitad, transportando aproximadamente 4 m² de concreto. Todos los camiones fueron probados.

La resistencia a compresión del HPCC *f'c,* determinada a partir de cilindros de 150x300 mm (ASTM C 39) alcanzó 124.8 MPa en promedio después de 28 días, con un máximo de 149 MPa y un mínimo de 109.8 MPa. La desviación estándar fue de 6.1 MPa y la variación estándar fue de 4.9%. El promedio del módulo de elasticidad *Ec* (ASTM C 469) alcanzó 47.7 GPa, con una desviación estándar de 4.2 GPa y una variación estándar de 8.7% (Fig. 7).

El HPCC instalado en la Torre–e puede ser comparado con el concreto de 30 MPa también utilizado en la estructura complementaria. La Tabla 2 compara las propiedades del concreto en la Torre-e con la estructura complementaria. La Asociación Brasileña

Fig. 6: Cilindros de prueba, de 100x200 mm y 150x300 mm, preparados en el sitio.

Actualmente, el concreto de alto com portamiento presenta grandes oportunidades para influir en la arquitectura en toda Sudamérica.

de Cemento, que está promoviendo y estimulando el desarrollo y el uso correcto del concreto de alto comportamiento, llevó a cabo las pruebas de laboratorio como un socio importante en el proyecto.

Las mayores ventajas de usar HPCC en el edificio de la Torre-e pueden resumirse como sigue:

- Alta resistencia que proporciona seguridad estructural
- Alta resistencia temprana permitiendo la remoción temprana de las cimbras
- Alta durabilidad
- Ejecución fácil y rápida del proyecto, con alta productividad y sin necesidad de retrabajar
- Fluencia más baja de la columna de concreto
- Mayor módulo de elasticidad y, por lo tanto, menos deformación
- Espacio utilizable adicional en la estructura final

La Tabla 2 proporciona una comparación de las propiedades entre el HPCC usado y el concreto normal o más convencional.

Los resultados del concreto fresco y el endurecido probaron ser excelentes y el proyecto, al alcanzar la terminación, puede ser considerado un éxito. La tecnología adecuada aplicada al concreto hizo posible la obtención de estos resultados con HPCC, al igual que el riguroso proceso de selección de materiales y el excelente control de calidad. Todo fue posibilitado por la sólida cooperación entre el equipo de colado de concreto seleccionado.

Actualmente, el concreto de alto comportamiento presenta grandes oportunidades para influir en la arquitectura en toda Sudamérica, así como también en el significado de la profesión de ingeniería en esa región. El diseño y la construcción que consideran el ciclo de vida y los costos de mantenimiento y el mejoramiento de la vida de servicio de las estructuras de concreto pueden maximizar la inversión, ahorrar materias primas, y elevar la autoestima del pueblo brasileño.

Fig. 7: Módulo de elasticidad a 28 días probado a 47.7 GPa con una desviación estándar 4.2 GPa y una variación estándar de 8.7%.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a Renato Giusti, presidente de la Asociación Brasileña del Cemento, por patrocinar la investigación del proyecto, y a Fernanda Pereira y Claudi Silva por su valiosa ayuda para desarrollar las pruebas y otro tipo de información. Un reconocimiento especial también para el ex presidente del ACI Terry Holland por alentar a los autores a escribir este artículo.

REFERENCIA

1. Levy S., and Helene, P., "Curing: How, When and Why?", *Téchme* , Sao Paulo, Pini, V. 4, No. 20, Jan.-Feb. 1996, pp. 18-21.

AUTORES

Dr. Paulo Helene es profesor de tiempo completo de la Universidad de Sao Paulo, Brasil, y miembro del ACI desde 1992. Es co-editor de ACI SP-187 (1999) y del ACI SP-207 (2003), ambos acerca de concreto de alto comportamiento. Ha trabajado durante 30 años en la educación, investigación y consultoría sobre materiales y estructuras de concreto. Helene también es presidente de IBRACOM (Instituto Brasileño del Concreto); presidente diputado de *fib (*CEB-FIP) Comisión 5, "Aspectos de la Vida de Servicio de una Estructura"; y presidente de Ibero-American Network sobre Rehabilitación de Estructuras de Concreto. Es miembro de otras asociaciones relacionadas con el concreto tales como ASTM International, NACE, y IABSE.

Carine Hartman es ingeniera civil desde 1998 y es especialista en construcción civil. Ella tiene una maestría y es estudiante de doctorado en la Universidad Politécnica de Sao Paulo, así como también miembro del IBRACOM, el Instituto Brasileño de Concreto.

*Este artículo se publicó en diciembre del 2003 en la revista *Concrete International* y se reproduce en *Construcción y Tecnología* con el permiso de los editores.