



E INGENIERIA ESTRUCTURAL



ASOCIACION DE INGENIEROS ESTRUCTURALES

Año 11 | Nro.27 | Septiembre de 2003 | Precio del ejemplar \$ 7.-

EDIFICIO E-TOWER

RECORD MUNDIAL EN EL USO DE HORMIGON COLOREADO DE ALTAS PRESTACIONES

CARINE HARTMANN
PAULO HELENE



Fig. 1- El edificio e-Tower, São Paulo, Brasil.

En el segundo semestre de 2001, la ingeniería brasileña se propuso un nuevo gran desafío: el de ejecutar una obra con hormigón de altas prestaciones (HPC), con valores de resistencia nunca antes utilizados en el país.

Fue así que se inició el diseño y la construcción en la ciudad de São Paulo del edificio e-Tower, presentado en la Fig. 1, uno de los más altos del Brasil, y que cuenta con las columnas de hormigón pigmentado de más alta resistencia a la compresión en el mundo: 125 MPa en probetas cilíndricas a los 28 días.



Figura 2 – Edifício Martinelli (1929), récord en altura, 106 m.

ANTECEDENTES

Brasil fue imponiendo de manera sucesiva varias marcas mundiales en la construcción de edificios, se pueden citar el Edificio Martinelli (São Paulo, 1929) con récord mundial en construcción de edificación en altura (106m), el Edificio Italia (São Paulo, 1959) también con récord mundial a esa fecha en construcción de edificación en altura (168m) y el Museo de arte de São Paulo (São Paulo, 1969) con récord mundial en vano libre de losa plana (80m).

EDIFICIO E-TOWER

Durante el segundo semestre de 2001 se dio inicio a la construcción de este edificio comercial de 162m de altura, que se convierte en uno de los más altos edificios de São Paulo, de acuerdo con la *Tabla 1*.

El e-Tower es un edificio comercial de 42 pisos con auditorio, gimnasio, 15 ascensores, helipuerto, dos restaurantes, dos escaleras mecánicas, una piscina semi-olímpica y estacionamiento para 800 vehículos. Tendrá también generadores para suplir el 100% de la energía del edificio y sistemas inteligentes de automatización y supervisión.

Las dimensiones de este imponente edificio brindan una idea de la magnitud de las cargas en sus columnas y en la fundación de las mismas. La zapata principal del edificio (14,90m x 26,90m x 2,30m) consumió un volumen de hormigón de 805m³. Es una zapata enorme que recibe una carga total de columnas de 27.000 toneladas. La *Figura 3* muestra el vaciado del hormigón en dicha zapata principal (hormigón con agregado de hielo).

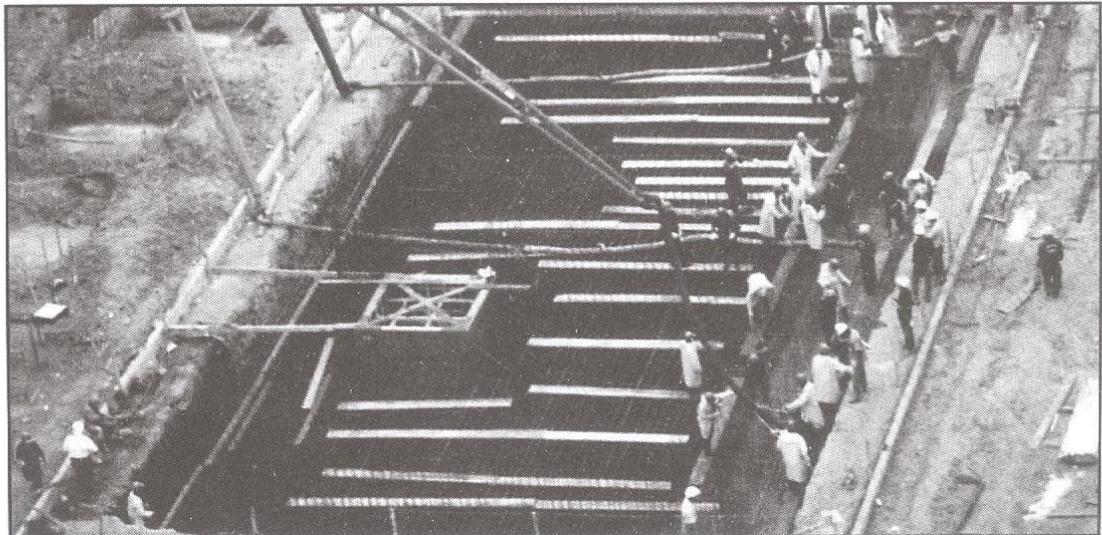


Figura 3 – Llenado de la zapata principal del edificio.

EDIFICIOS	ALTURA (M)	AÑO	PISOS	CIUDAD
Zarzur Kogan Palace	189	1960	50	São Paulo
Conde Pereira Carneiro	172	1976	42	Rio de Janeiro
Itália	168	1956	45	São Paulo
CENU	167	1997	38	São Paulo
Universidad Cândido Mendes	165	1998	42	Rio de Janeiro
Rio Sul Center	164	1980	50	Rio de Janeiro
Banespa	161	1947	35	São Paulo
Banco Central	150	1991	35	Brasília
Birmann 21	149	1997	33	São Paulo
Bank Boston	145	2002	30	São Paulo

Tabla 1 - Edificios más altos de Brasil (adaptado del site skyscraperpage)

Inicialmente, el proyecto fue calculado con una resistencia a la compresión de 40 Mpa, valor que fue empleado para todas las columnas del edificio. Sin embargo, esto debió reverse, ya que por especificaciones de diseño en los estacionamientos resultaba indispensable que las secciones transversales máximas de estos elementos estructurales no sobrepasaran 0,70 m x 0,60m. Se plantearon a la constructora las posibilidades de solución existentes y sus respectivas restricciones:

- Alterar la posición de las columnas en los pisos sería inadecuado debido a que la fachada perdería sus características y no respetaría la coordinación modular, perjudicando la eficiencia del proyecto arquitectónico;
- Desplazar las columnas en la zona de los garajes no sería aconsejable técnicamente, dada la altura del edificio (más de 40 pisos) y sus elevadas cargas;

- Aumentar la resistencia característica a la compresión de las columnas podría ser una buena solución, siempre cuando ésta fuese viable tanto técnica como económicamente, aunque para lograr la disminución requerida de las dimensiones, la resistencia a la compresión necesaria sería realmente elevada.

EL RETO ESTRUCTURAL

Después de varias reuniones entre constructores, arquitectos y equipo estructural, fueron descartadas las dos primeras opciones porque no convenían al proyecto arquitectónico ni a la viabilidad técnica. De esta forma, la decisión fue la de reducir la sección de las columnas del subsuelo mediante un aumento considerable de la resistencia a la compresión para esos pilares. Así, todos los cálculos fueron ajustados para que las columnas tuvieran las dimensiones requeridas.

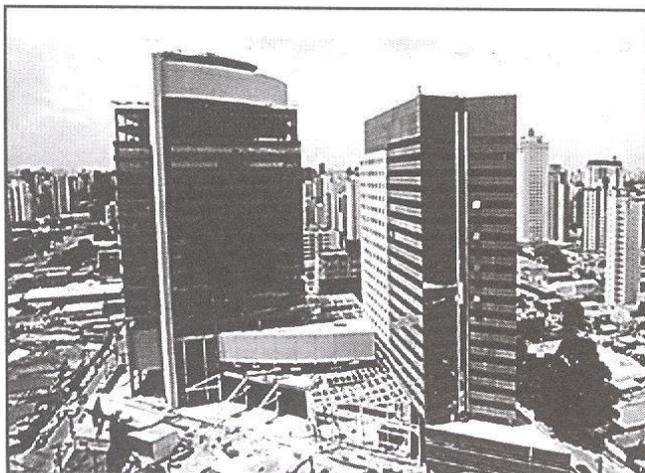


Figura 4 – (a) Uso del HPC en Brasil CENU en 1997

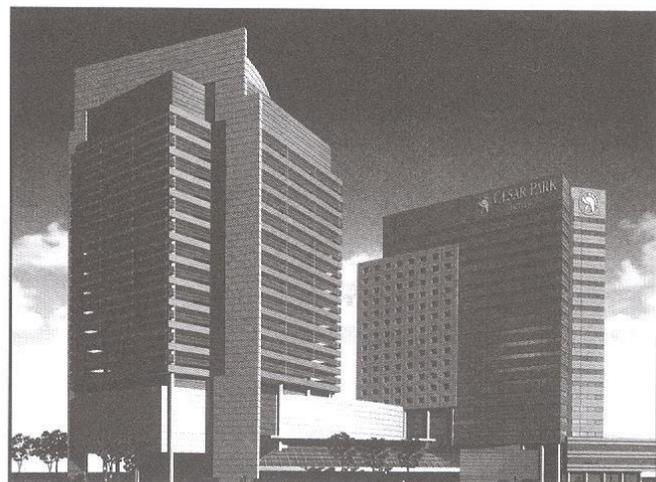


Figura 4 – (b) Continental Square en 2001.

Cemento Portland	Alta resistencia con 30% escoria	1,0
Agregado grueso	Grava - Basalto	1,65
Agregado fino	Arena cuarzosa fina	0,88
Pigmento (Bayer)	Oxido de hierro	4%
Adiciones minerales	Humo de sílice y metacaulim	15%
Aditivos MBT y GRACE	Superplastificante	1%
	Retardador	0,5%

Tabla 2 – El diseño del HPCC del e-Tower.

Una resistencia a la compresión en torno de los 50 MPa constituye una práctica comúnmente utilizada en Brasil, donde se pueden citar algunas obras como: el CENU (Centro Empresarial Nações Unidas) en São Paulo, con columnas con resistencia a la compresión de 50 MPa, el Continental Square en São Paulo también con 50 MPa, los Edificios Suarez Trade Center y del Banco de Tokio, ambos en Salvador, con resistencias de 60 MPa. También puede ser citado el refuerzo del vano central del puente Rio-Niterói, con hormigón de 92 MPa.

En el edificio más alto del mundo, las Torres Petronas en Kuala Lumpur (Malasia), se utilizó HPC de 80MPa para sus columnas. Otras obras importantes en el mundo han utilizado este tipo de hormigón: el gran Arco en París, el Pacific Center en Seattle con 115 MPa y el Water Tower Place en Chicago con 60 MPa, son algunos ejemplos.

DISEÑO DEL HPC

Una vez definido el tipo de hormigón a utilizar, la constructora tomó las siguientes precauciones:

- Aprobación y apoyo de los cambios realizados por los autores del proyecto;
- Convenio tecnológico con la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo y con la Asociación Brasileña del Cemento Portland (ABCP);
- Contrato con una planta de hormigones (Engemix) con la capacidad de producir el HPC necesario, tanto por su volumen como por la dificultad tecnológica.

Inicialmente, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para lograr la resistencia deseada y que se mantuvieran las ventajas en el manejo de este hormigón en estado fresco. No se descuidó el control de las temperaturas

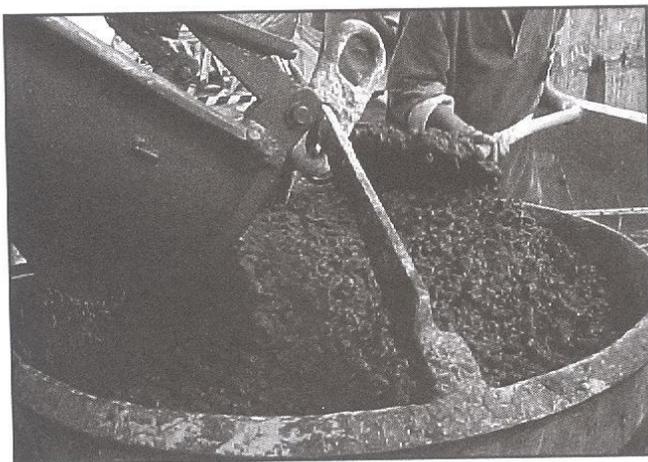


Figura 5 – El hormigón coloreado terracota, con pigmento de óxido de hierro.

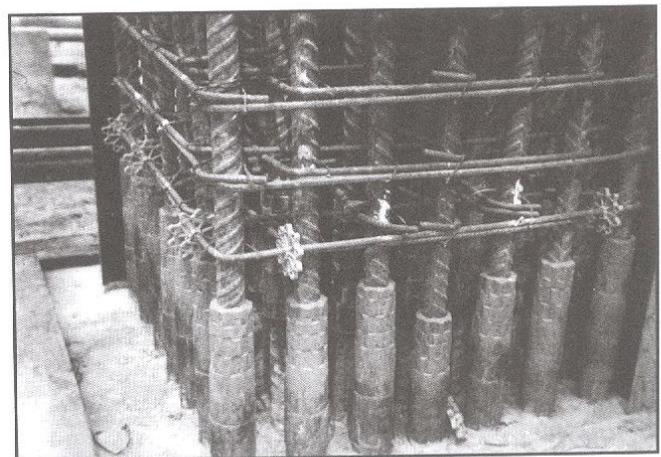


Figura 6 – Cuantía de acero de las columnas.

del hormigón en la fase de fraguado, dado que por las grandes cantidades de cemento a utilizar, el calor liberado en la reacción de hidratación sería bastante elevado, así fue que se decidió emplear hielo en reemplazo del agua. La *Tabla 2* presenta el diseño final de ese hormigón coloreado de altas prestaciones (HPCC por *high performance colored concrete*) empleado.

EL USO DEL COLOR

Para diferenciar el hormigón de mayor resistencia de los demás utilizados en la obra, y también por decisión arquitectónica, fue utilizado en los sótanos un pigmento a base de óxido de hierro, que finalmente dio el color terracota (*Figura 5*).

CONSTRUCCION DE LA ESTRUCTURA

Con los valores de resistencia obtenidos y verificados en laboratorio y con el hormigón aprobado en los ensayos y pruebas preliminares, se inició el vaciado de las columnas de HPCC. Fue empleado un volumen total de 150m³ de HPCC.

La elevada densidad de armadura (*Figura 6*) y las características de alta cohesión exigieron del equipo de obra un especial cuidado para garantizar el vaciado adecuado. El transporte del hormigón de las columnas fue realizado por medio de grúas colocando los baldes verticalmente sobre las cimbras. El vaciado del hormigón se realizaba desde una altura de 4m con caída libre.

El asentamiento del hormigón fresco fue de 14 a 20 cm, pues era necesario permitir un buen vaciado en la obra. La densidad del hormigón fue fundamental para lograr que en la base de las columnas no se presentara ningún tipo de segregación.

Para facilitar la ejecución, los aditivos fueron adicionados en la planta de hormigón. El transporte por las calles de São Paulo demoró entre 30 y 50 minutos. Con las altas proporciones de aditivos, el hormigón reaccionó de manera diferente; en algunos casos, el hormigón comenzaba a fraguar de manera más lenta que lo inicialmente planteado.

La resistencia a la compresión medida en probetas cilíndricas de diámetro 15cm y 10cm fue de 125 MPa a los 28 días en promedio y después de 63 días, del orden de 149 MPa. Cuando se utilizaron probetas cúbicas, el valor subió en el orden del 20%. El valor promedio del módulo de elasticidad fue de 48 GPa.

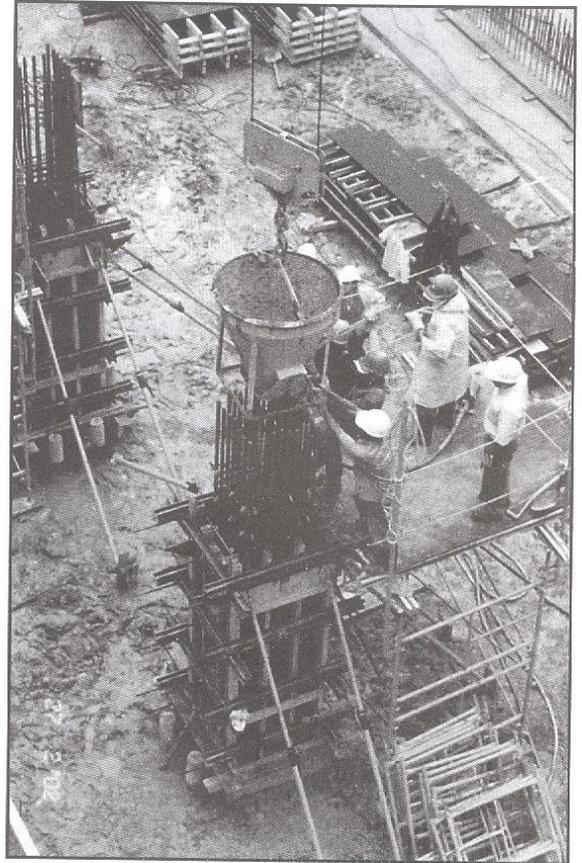


Figura 7 –(a) Vaciado del hormigón con grúas.

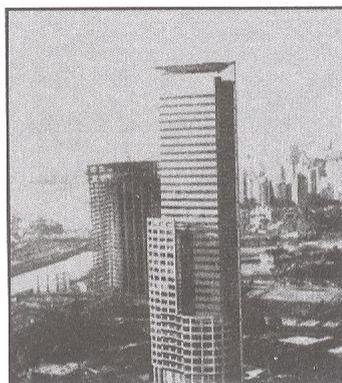


Figura 7 –(b) Prueba de asentamiento del hormigón pigmentado.

Propiedades		HPCC f _c = 125MPa	NC f _c = 30MPa
Resistencia a la compresión ASTM C 39	7 días 28 días 63 días 91 días	111 125 141 155	18 36,0 41 44
Módulo de Elasticidad ASTM C 469	28 días	47 GPa	33 GPa
Resistencia a la tracción ASTM C 496	28 días	10.0	3.3
Carbonatación 28d + 63d , 25 oC, HR 65%, CO ₂ 5 %	91 días	0	28 mm
Absorción de agua, densidad y volumen de poros ASTM C 642	absorción de agua absorción de agua después de hervura volumen de poros poros después de hervura densidad	0.35 % 0.41 % 1.0 % 1,1 % 2,500 kg/m ³	5.1 % 5.8 % 13.2 % 15.1 % 2,320 kg/m ³
Absorción capilar ASTM C 1403	absorción capilar después de 72 horas máxima ascensión interna de agua después de 72 horas	1.2 kg/m ² 0 mm	12.0 kg/m ² 99.0 mm
Penetración de Ion cloruro ASTM C 1202 Velocidad de pulso ultrasónico ASTM C 597		43 C 4,950 m/s	8,000 C 3,250 m/s

Tabla 3 - Comparación entre Hormigón HPCC y Normal.

CONCLUSIONES



Por su imagen y por la tecnología aplicada, el e-Tower se convirtió en una referencia para la construcción civil brasileña. Muchas fueron las ventajas obtenidas con el empleo del HPCC en esta obra:

- Estructura más resistente que proporciona mayor seguridad estructural;
- Elevada durabilidad (vida útil de más de 500 años);
- Ahorro en espacio ganado: 16 nuevos lugares de estacionamiento;
- Ahorro en hormigón, con una economía en costos total de 7%.

La **Tabla 3** presenta la comparación del hormigón normal con el HPCC usado en el e-Tower. 