



Berlín: Emblema del siglo XX, Vanguardia del Nuevo Milenio

Arquitecta Isaura González Gottdiener

Situada en el centro de Europa, desde su fundación a mediados del siglo XIII fue punto de encuentro comercial entre Oriente y Occidente junto con su vecina Cölln. Asentadas respectivamente sobre la ribera oriental y una isla del río Spree, en 1308 las poblaciones se unificaron administrativamente y a finales del siglo XV el castillo de Cölln se convirtió en residencia permanente de los Hohenzollern, electores de Brandemburgo.

Con la Guerra de los 30 años se dio la primera devastación de la ya floreciente ciudad. Federico Guillermo de Brandemburgo la reconstruyó y amplió, y recibió, tras la renovación del Edicto de Nantes en el siglo XVII, a grupos de hugonotes franceses y protestantes holandeses que trajeron consigo nuevas profesiones y un espíritu abierto, con lo que la urbe estableció su vocación de modernidad y multiculturalización.

A partir de ahí, Berlín se convirtió en un resplandeciente centro de la Ilustración al tiempo que fungió como capital del Imperio Alemán, con lo que se acentuó su función burocrática. La temprana introducción de la industria originó un *boom* demográfico espectacular: de 172 mil habitantes en 1800 pasó a 428 mil en 1859, y a dos millones en 1905.

En el siglo XIX, Schinkell construyó sus magníficos edificios neoclásicos que convivieron con espacios públicos y monumentos barrocos ordenados por grandes avenidas. La edificabilidad se limitó a 24 metros y aparecieron las viviendas de alquiler. El Reichstag, mudo testigo de los días por venir, ocupó un solar más de la pujante ciudad que se convirtió en el Gran Berlín en tiempos de la República de Weimar.

Berlín condensa la historia europea del siglo XX

Durante el período de entreguerras, la capital alemana fue la ciudad más animada y moderna de toda Europa. Sus calles



Aquí! 

Resumen

El siglo XX, con sus profundos cambios y sus conflictos bélicos, ha visto cambiar la faz de las ciudades en todo el orbe. Esto es particularmente cierto en Berlín, que luego de haber sido restituida como capital de Alemania reunificada, recibe el nuevo milenio con su corazón renovado y remienda profundas heridas, producto del devenir político de esta centuria que tocó fin precisamente en esta ciudad el 9 de noviembre de 1989, al caer el muro que la dividió durante 28 años

y plazas cobraron fama mundial. Doce años de esplendor fueron abruptamente frenados con la llegada de Hitler al poder en 1933. Berlín, que fuera opositora al nazismo, se convirtió en su centro de mando y sufrió con la guerra su más terrible destrucción.

“Las ruinas de Berlín deben ser conservadas como una Babilonia o una Cartago moderna, como un signo del rechazo al militarismo prusiano y al régimen nazi. La ciudad ha muerto por completo. Se recorren kilómetros a través de ruinas humeantes y no se encuentra nada habitable. Esta ciudad jamás podrá ser reconstruida”. Tales fueron las palabras que Arthur Tedder, mariscal de aviación británico, profiriera al recorrer los 80 millones de metros cúbicos de escombros que resultaron de la guerra. Sin embargo, no solo el ave fénix resurge de las cenizas, y la Alemania dividida se dio a la tarea de reedificar su otrora capital, dividida entonces en dos bloques políticos contrapuestos.

De las ciudades se recuerdan sus monumentos, sus calles, sus plazas. Por casi tres décadas el muro es la identidad de Berlín. Urbanismo socialista en el este, ciudad cosmopolita en el oeste, cada polo invierte en la reconstrucción de su sector millones en un afán por demostrar su supremacía. Las calles y plazas cambian de vocación y se establecen nuevos centros urbanos. Puestos fronterizos tales como el Checkpoint Charlie se convierten en iconos de la guerra fría.

La fisonomía de la ciudad se transforma. Walter Gropius, Alvar Aalto, Scharoun, Schüller y Mies van der Rohe son algunas de las figuras de la arquitectura internacional que intervienen en la reconstrucción de Berlín Occidental. Modernos edificios, calles bulliciosas y transitadas y anuncios luminosos contrastan con la calma oriental donde grandes avenidas y austeras plazas recuperan los antiguos edificios históricos junto a nuevos bloques alineados simétricamente que siguen los cánones de la arquitectura socialista. Polos opuestos, ambas mitades crecen protegidas por sus sistemas y curiosas miradas atraviesan la frontera de 207 km de concreto, minas, escuchas y torres de vigilancia, buscando en el otro lado su contraparte perdida.

1989 trae consigo vientos nuevos. La cortina de hierro se derrumba con una celeridad que asombra al mundo entero.

El 9 de noviembre miles de alemanes festejan eufóricos la apertura de los 81 puertos fronterizos que dividieron la ciudad emblemática de la segunda mitad del siglo XX. Una nueva historia comienza para Berlín y las propuestas para su recuperación urbana no se hacen esperar. Mientras se desata la polémica acerca de su restitución como capital de la Alemania reunificada, arquitectos y urbanistas la convierten en un laboratorio de ideas que acusan todo tipo de soluciones. Hoy, de la gran cicatriz dejada por el muro retoña la traza urbana que tuviera en su época de esplendor, y modernos edificios surgen de sus viejas entrañas para situarla de nueva cuenta como la metrópoli europea más moderna de su tiempo.

La ciudad renace desde sus entrañas

Las ciudades son bellas porque son creadas lentamente; están echas de tiempo. Una ciudad nace de una maraña de monumentos e infraestructuras, cultura y mercado, historia nacional e historias cotidianas. Toma cinco siglos crear una ciudad y cincuenta crear un barrio. (Renzo Piano)

Recrear los barrios berlineses que cobraron fama durante los años veinte es una labor titánica que no tiene precedentes en la historia del urbanismo moderno. Un bosque de grúas trabaja afanosamente en Berlín y los actores de la mayor obra inmobiliaria que se lleva a cabo en el planeta son conocidas empresas internacionales y las estrellas de la arquitectura mundial. Las obras se han convertido en el museo más visitado de la ciudad y también en la factura más costosa que está pagando el gobierno alemán tras la reunificación.

Se calcula que cuando la reordenación haya finalizado habrá 500 mil viviendas nuevas, 200 mil (principalmente en el Este) reconstruidas, 11 millones de metros cuadrados para oficinas, además de otro millón para centros comerciales, y la realización de un gran complejo de infraestructuras que incluye obras de canalización, túneles en el subsuelo y el dragado de inmensas superficies de terreno con el fin de combatir las aguas freáticas sobre las que se asienta esta gran ciudad. Además, el traslado del gobierno federal está generando la construcción de varios edificios oficiales y la rehabilitación de otros como el legendario Reichstag, incendiado en pleno nazismo y vacío desde entonces, y

reconvertido ahora con la intervención de Norman Foster, en sede del Bundestag.

La recuperación de la Postdamerplatz, que fuera antes de la guerra el corazón de la ciudad, pretende que ésta sea nodo entre los dos Berlines que tras 10 años de vivir sin muro continúan separados. Este inmenso espacio de 67 mil metros cuadrados alojará un complejo comercial y de oficinas en el que ya destacan elegantes siluetas como la de la nueva sede central de la compañía automovilística alemana Mercedes Benz, obra del italiano Renzo Piano, o las de la multinacional Sony de Arata Isozaki. La llamada "franja de los muertos", que se prolonga hasta la puerta de Brandemburgo, es el lugar crítico de la reconstrucción por haber sido tierra de nadie y nostalgia de muchos. El plan urbano de los alemanes Hilmer & Satter retoma la traza del siglo XIX: terrazas de cafés, ciudadanos paseando, comerciantes ofreciendo su mercancía, la yuxtaposición de bloques de viviendas, oficinas, comercios y fábricas en los patios. Rafael Moneo, Georgio Grassi y Richard Rogers, junto a otros arquitectos de renombre, ven surgir sus obras próximas a la Filarmónica de Scharoun y la Galería Nacional de Mies. Los asombrados paseantes observan la magnitud de esta empresa desde el Info-Box, edificio provisional que se alza en medio de las construcciones.

Otras calles que vuelven a tomar vida son la Friedrichsrasse y la mítica Unter den Linden, la avenida bajo los tilos que fuera eje de la ciudad y por la que desfilaban los ejércitos prusianos y los hitlerianos. Durante los años de la guerra fría fue sede de las embajadas de las potencias del Este y en ella se paseaban probablemente la mayor cantidad de espías del mundo. Hoy, recuperada su vocación turística y comercial, opaca incluso a la Kurfürstendamm, la fulgurante Ku'damm que deslumbrara con sus escaparates a los alemanes del este ajenos a los patrones de la sociedad de consumo.

La reordenación de espacios como la Alexanderplatz que inspirara su célebre novela a Alfred Döblin (Berlin Alexanderplatz), sigue inmersa en la polémica. Convertida en un frío monumento del realismo socialista, la plaza que a principios de siglo concentrara la vida cultural y nocturna de Berlín será difícil de recuperar. La torre de televisión, símbolo del poderío tecnológico del Este alemán, espera

vigilante que los planificadores decidan su suerte. Lo mismo les sucede a muchos edificios que tras la guerra quedaron olvidados y hoy permanecen en pie esperando que la piqueta los derrumbe.

Otros espacios como la isla de los museos, tienen el futuro más claro y recuperan la grandeza y belleza que tuvieron durante siglos. El barrio de Kreuzberg, que por su cercanía con el muro era habitado por turcos y artistas, hoy es disputado por las clases altas y en Pankow las antiguas casas de diplomáticos y dirigentes del gobierno democrático se convierten en residencias o casas de cultura. De este modo la ciudad se reinventa día con día y encara, a pesar de las dificultades, el futuro con optimismo. Incluso en el ya mítico Checkpoint se construye un edificio vanguardista de oficinas que se llamará Berlin Checkpoint Charlie Plaza.

Las cicatrices que el tiempo debe borrar

La reunificación Berlín no sólo se ha topado con el contraste urbano entre ambas partes sino con la duplicidad de sus elementos. Hay dos torres de televisión, dos museos de cada especie, dos galerías nacionales, dos parques zoológicos y hasta tres aeropuertos. La reordenación de estos espacios enfrenta un grave problema, sobre todo de tipo presupuestal, ya que la caída del muro trajo consigo un importante recorte de fondos que los otrora mimados habitantes de esta urbe han recibido sin mucho entusiasmo. En el plano social es donde más se aprecia lo complejo que resulta unir las dos mitades. Tras la euforia del ansiado derrumbe, oisis y wesis siguen habitando sus antiguos barrios y el mestizaje entre ambos prácticamente no se ha dado; un nuevo muro existe ahora en las conciencias que esperan la solución de sus problemas con la llegada del gobierno federal.

He visitado Berlín en cuatro ocasiones, dos antes de la caída del muro y dos después. Muchas de las imágenes que evoco son sólo diapositivas de mi memoria. Cruzar la frontera en el Checkpoint Charlie constituye una experiencia histórica irreplicable. Subir a la torre de televisión en Alexanderplatz y observar a los alemanes del este mirar hacia la otra mitad como algo lejano e inalcanzable es un recuerdo más de la guerra fría. Hoy, la flamante capital alemana reconoce sus nuevos límites y deja atrás sus



fantasmas. Poblada de inmigrantes, vuelve a ser el crucero
de Europa y busca en sus cicatrices su identidad rota.

Crear con concreto lanzado

Kurt Hermann

Concreto lanzado

El concreto lanzado es un concreto que, por medio de un sistema de tuberías cerrado (flexible, de matriz, o una combinación de ambos), resistente a la alta presión, es transportado hasta el lugar de su utilización, en donde se lo aplica por lanzado y se lo compacta.

Con el procedimiento por vía seca, los materiales que van a lanzarse (agregados, cemento, aditivos eventuales tales como cal hidráulica) con consistencia de tierra húmeda, son transportados por medio de aire comprimido y mezclados en la lanzadora con agua o con una mezcla de agua y aditivos. Con el procedimiento por vía húmeda, el concreto listo generalmente es transportado hasta el punto de lanzamiento por bombeo.

Aplicaciones

El concreto lanzado es conveniente, sobre todo, para los elementos de construcción delgados de grandes superficies así como para los de forma complicada. Sustituye entonces ventajosamente al concreto tradicional cuando este último no puede ser colocado más que de una manera difícil o exige cimbras costosas.

La lista de posibles aplicaciones es larga. Comprende la estabilización de puentes y de excavaciones, así como de roca en trabajos subterráneos; la reparación de elementos de construcción en concreto o en mampostería degradada, así como también la impermeabilización de obras hidráulicas. El concreto lanzado ha pasado igualmente la prueba en la construcción de pistas de tobogán en la nieve, de techos y domos así como de rocas artificiales.

Elevándose sobre la colina de Dornach, a lo lejos se ve el Goetheanum. Esta construcción, hecha de concreto armado y con una arquitectura fuera de lo común, se construyó entre los años 1925 y 1928, según una maqueta de Rudolf Steiner. Era la primera vez que se utilizaba



Resumen

Este artículo presenta los detalles técnicos del trabajo realizado en la obra de renovación de la gran sala del Goetheanum de Domach. Las estructuras realizadas tienen el aspecto de bloques de piedra tallada; en realidad, se trata de concreto lanzado aplicado sobre un almacén prefabricado y después trabajado a la manera de una escultura

concreto armado para crear formas plásticas monumentales.

La gran sala

El acondicionamiento interior del Goetheanum se terminó apenas en los años que van de 1996 a 1998. Por ejemplo, la gran sala, de la que aquí trataremos, se adaptó provisionalmente en 1956 y 1957. Sus dimensiones son impresionantes: En la obra negra mide 30 m de largo y, en promedio, 27 m de ancho y 21 m de altura, con un volumen de aproximadamente 17,000 metros cúbicos.

La acústica deficiente y el techo de asbesto que había que eliminar fueron dos razones importantes para repensar el reacondicionamiento de esta sala prevista para mil espectadores. Se encontró finalmente una solución satisfactoria después de varios años de esfuerzo. Por razones de acústica, se redujo el volumen de la sala a 11,000 m³, incorporándole diferentes elementos: los siete pilares de los muros norte y sur de los grandes lados, inicialmente previstos como relieves y pilastras, se desplazaron aproximadamente 2.8 m hacia el interior. Detrás de los pilares se encuentran pasajes para acceder a las filas de asientos. Los capiteles de los pilares sostienen una arquivolta de 7 m de altura (figura 1). Se incorporaron también una platea y un escenario. El plafón de yeso, además, se suspendió un poco más abajo.¹

La elección del material

Puesto que se consideró que la madera era inapropiada para la realización de esta inmensa obra, el concreto lanzado se ofreció como un sustituto prometedor. Después de numerosas pruebas preliminares, se optó por concreto lanzado por vía seca. El concreto lanzado debería permitir preformar en gran medida las formas plásticas de los elementos incorporados, y después trabajarlos como si fueran esculturas. Los que tuvieron esta idea y los empresarios se vieron confrontados a diferentes problemas.²

· Era necesario crear superficies de apoyo para los elementos incorporados.

· Puesto que la capacidad de soporte de los cimientos era limitada, los elementos incorporados deberían estar hechos de concreto ligero ($\rho = 1,400 \text{ kg/m}^3$), con los muros lo más delgados posible.

· El concreto lanzado debería resistir el tallado con hachuela.

· El material que fuera a lanzarse debería elegirse de manera que el aspecto del concreto tallado correspondiera a lo que quisiera el maestro de obra.

· El tinte rojizo de las estructuras de la enorme superficie debería ser uniforme.

· La mezcla seca debería ser fabricada en la cantera y transportada hasta el punto de lanzamiento, sobre una distancia de aproximadamente 120 m (con una diferencia de altura 30 m).

La mezcla seca que se presenta en la Tabla 1 permitió satisfacer estas exigencias, así como otras que no se mencionan aquí.

El pigmento y el aglomerante fueron mezclados en la central, a fin de obtener una coloración regular del concreto lanzado. La mezcla seca se preparó en una mezcladora mecánica en dosificaciones de aproximadamente 135 l. Esto facilitó el transporte y la obtención de un concreto lanzado plástico y adherente.

La armadura

Los perfiles de acero, colocados sobre el fondo de la sala y anclados en los muros exteriores, constituyen la estructura portadora de los elementos incorporados (figura 2). Las formas en relieve, compuestas del acero de la armadura y de malla de acero soldado, y que constituyen el esqueleto en acero redondo, se fijaron a estas construcciones. Los esqueletos en acero redondo para los dos arquivadros de 30 m de longitud y 7 m de alto, así como los elementos de los capiteles y de los socos de los que formaban parte, fueron prefabricados y colocados en el suelo de una sala Zwingen BL de fabricación al vacío.

Hay en total 1,200 puntos de referencia que, para cada uno de los muros laterales, fueron transportados de la maqueta (1:20) sobre el acero soldado (figura 3). Los dos esqueletos fueron después fraccionados en piezas transportables (figura 4). Estos esqueletos se fijaron a los perfiles de acero de la gran sala (figura 5) y fueron completadas por el esqueleto de acero redondo de los pilares y de los muros laterales y frontales fabricados en la sala.³ Una "cimbra perdida," compuesta de metal desplegado, sirvió de soporte para el concreto lanzado. Las placas de metal de fierro de 0.5 mm de espesor eran fáciles de cortar y de darles forma. Esta cimbra se fijó cada 2 cm por detrás del esqueleto de acero redondo mediante separadores de plástico y amarres de acero (figura 6).

El concreto lanzado

El concreto lanzado fue aplicado en tres capas por técnicos experimentados (figura 7). Se preveía un espesor suplementario de 4 cm en los lugares difíciles de trabajar a manera de escultura, y de 2 cm en las zonas planas.

Se fijaron mallas azules de fibra de vidrio de hilo fino sobre la segunda capa (figura 8). Su función era, por una parte, repartir la fisuras por contracción, es decir, servir de armadura, y por otra parte, señalar a la hora del trabajo dónde terminaba la capa que había que tallar sobre el concreto lanzado.

La superficie relativamente rugosa del concreto lanzado favoreció la adherencia entre las capas, las cuales se aplicaron con un intervalo de aproximadamente siete días. El tratamiento de curado se hizo manteniendo el ambiente húmedo, así como también mojando directamente la superficie de concreto.

Se trata de un total de 700 m³ de mezcla seca que se utilizaron y transformaron en concreto lanzado. La superficie del concreto lanzado tallado fue de alrededor de 2,200 metros cuadrados.

Después del trabajo con hachuela y con otras herramientas, el espesor de pared de los elementos

incorporados era de alrededor de 8 centímetros.

En el cuadro 2 figura una selección de las propiedades del concreto endurecido después de 28 días.

Trabajo en forma de escultura

Las superficies de concreto lanzado fueron trabajadas por numerosos auxiliares, así como por escultores de los más diversos países (figuras 9 a 11). El aspecto de las superficies es sorprendentemente uniforme. El rojo del concreto lanzado, inicialmente dominante, se atenuó, ya que el color de los aditivos adquirió más fuerza. Los defectos típicos del concreto lanzado, tales como inclusiones de rebotes, sombras y vacíos, son raros, y lo mismo ocurre en el caso de las fisuras, a pesar de ser estructuras complejas.

Este artículo se basa esencialmente en las conversaciones con Hans Hasler, director administrativo de Goetheanum-Bau en Dornach, y con Pietro Teichert, director de Laich S.A., Avegno.

Otras fuentes:

1. H. Hasler, "Die Neugestaltung des grossen Saales im Goetheanum", Schweizer BauJournal 1998 (2), pp. 40-46.
2. P. Teichert, "Künstlerisch gestaltete Schalen aus Spritzbeton", manuscrito de la exposición para el seminario "Spritzbeton-technologie '99 de 21/22.1.99 alnnsbruck-Igls.
3. H. Hasler y J. Buess, "Der grosse Saal im Goetheanum 1996-1998", editado por la administración de Goetheanum-Bau, Dornach, 1998.

Este artículo se publicó en TFB Bulletin du ciment y se reproduce con la autorización de Technisue Forschung.und Beratung.fu".r.Zement und Beton



Diseño de cimbras tubulares

Aviad Shapira

Aquí ! 

Las cimbras tubulares son la solución preferida de moldeo para losas, vigas y otros elementos muy elevados de concreto colado en obra. Estas cimbras son muy adecuadas para elementos que se elevan a alturas tales que la solución común de puntales individuales deja de ser adecuada (comúnmente a alturas mayores a 3 a 4 metros).

Resumen

Existen otras soluciones para construcciones de concreto colado en la obra y con grandes claros, con base en moldes soportados por elementos verticales de la estructura construida (por ejemplo, muros, columnas). Sin embargo, tales elementos pueden no estar a disposición en los lugares requeridos, si es que los hay. Así pues, se utilizan ampliamente cimbras tubulares, que están disponibles en el mercado en varias configuraciones y pueden observarse en lugares de construcción de edificios públicos, comerciales e industriales, así como también en la construcción de carreteras, puentes que se elevan a alturas entre 3 y 30 m e inclusive más altos (figura 1).¹

A pesar de que las cimbras tubulares son la solución más empleada para moldear elementos estructurales muy elevados al colar concreto en la obra, pocos son los especialistas que dominan su diseño. El método que aquí se presenta conjunta el conocimiento y la experiencia existentes en una herramienta práctica que permite resolver casos particulares de manera económica a quienes realizan estos trabajos.

A pesar de su uso común, sólo un número limitado de especialistas tiene el conocimiento para el diseño de cimbras tubulares. Además, el proceso mismo de diseño a menudo se complica y se hace difícil de generalizar, debido a la variación e irregularidad que caracteriza a las estructuras que contienen tales elementos de concreto. La falta de datos básicos de diseño (por ejemplo, horas de trabajo) también complica la capacidad de comparar diseños alternativos y de producir soluciones económicas.

Este artículo informa sobre un método, fundamentado en datos y conocimientos, para el diseño económico de sistemas de cimbras basados en bases tubulares para elementos de concreto elevados. Se presentan aquí dos componentes principales de este método:

. Un sistema inteligente que combina un modelo de construcción orientado al objeto, una base de conocimientos y gráficas por computadora para generar automáticamente la

entrada de información requerida, determinar las disposiciones generales de las torres, llevar a cabo análisis estadísticos y evaluaciones económicas, y elaborar planos de trabajo.

. Una base de datos económica que se enfoca actualmente a entradas de información de trabajo (horas) en el montaje y desmantelamiento de las bases tubulares de varios tipos y alturas.

En el corazón del método propuesto están la formalización del conocimiento correspondiente a cimbras tubulares y la estructuración de la experiencia de personas, para poner ambas a disposición de los profesionales a través de una herramienta de apoyo de diseño orientado a la práctica.

Cimbras tubulares

La cimbra tubular es única en varios aspectos:

. A diferencia de una base ajustable individual, la torre tiene una geometría en su proyección horizontal o una sección transversal en dos dimensiones, y por lo tanto, su localización en el edificio se ve grandemente afectada por diversas restricciones geométricas del mismo.

. A diferencia de los elementos de concreto de altura regular, tales como los de edificios residenciales, donde los puntales individuales son la solución de apuntalamiento común, los elementos muy elevados en estructuras para las cuales se emplean frecuentemente las cimbras tubulares, no son uniformes, no se parecen uno a otro y con frecuencia están marcados por variación e irregularidad difíciles de generalizar. Consecuentemente, casi cada caso particular necesita su propia solución individual.

. La altura de la cimbra afecta grandemente el costo del proceso de cimbrado. Si, por estimaciones comunes, la cimbra representa de 35 a 60 por ciento del costo del concreto colado en la obra,² entonces las cimbras tubulares pueden llevar los números al límite superior de este rango, e inclusive más arriba. Por lo tanto, la utilización eficiente de las cimbras tubulares o, con más precisión, el uso de tan pocos elementos tubulares como sea posible para un diseño seguro, es de la mayor importancia económica.

. La altura, por supuesto, afecta la estabilidad de cada torre y la estabilidad total de la cimbra. Esto debe considerarse con gran detalle y a menudo da como resultado soluciones no convencionales. Sin embargo, la altura no afecta la disposición horizontal de las torres.

Estos factores con frecuencia hacen problemático el proceso no estándar de diseño de la cimbra basada en altas bases tubulares. En muchos aspectos, es una profesión especializada, y el número de expertos en esta área es considerablemente menor que el del diseño común de cimbras.

El problema puede verse también en el producto final, no solamente en el proceso. Con frecuencia se observan en los lugares de construcción soluciones que no son económicas, con cimbras tubulares que están claramente subutilizadas. Este es el resultado, o bien de una consideración inapropiada de las restricciones geométricas del edificio, o bien de una pobre combinación de elementos tales como cimbras tubulares de gran capacidad con largueros y viguetas débiles.

Así pues, se formulan a continuación los objetivos principales del sistema propuesto:

Servir como una ayuda práctica de diseño en manos de muchos, empleando el conocimiento, la experiencia y la pericia de unos pocos.

Proveer de soluciones para casos particulares, tomando en cuenta consideraciones específicas.

Poner mayor énfasis en la economía de las soluciones.

La manera en que estos objetivos generales se llevan a la práctica con una consideración específica de la cimbra tubular está fuertemente ligada al proceso de diseño de tal cimbra.

Pueden identificarse cuatro etapas principales de diseño:³

1. Selección del elemento

Comúnmente, los elementos seleccionados están disponibles en la compañía constructora o se han utilizado previamente de manera satisfactoria, o ambas cosas. En cualquier caso, la selección de elementos no es necesariamente un acto de un solo tiempo, puesto que a menudo la decisión inicial se cambia

sobre la base de las siguientes etapas de diseño.

2. Disposición de las torres

La etapa que constituye la mayor diferencia entre el diseño de la cimbra de claro bajo con base en puntales individuales y el diseño de la cimbra tubular alta es la determinación de la disposición total de las torres. En esa etapa, el diseñador examina los planos de la estructura, analiza las restricciones principales –geométricas y de otro tipo (por ejemplo, la necesidad de dejar un pasadizo para el tránsito de personas y vehículos)– y, con base en el conocimiento y la experiencia, produce una disposición general de las torres. Con frecuencia se genera más de una solución, y la decisión en cuanto a cuál adoptar se hace solamente en una etapa posterior.

3. Análisis estadístico

Una vez que se ha determinado la disposición de las torres, se calculan los espaciamientos de elementos para las viguetas, los largueros y las torres, con apego a los requisitos de resistencia, estabilidad y seguridad. Para más de una opción de disposición de las torres o de combinación de los elementos, ésta es la etapa en que las opciones se reducen.

4. Evaluación económica

Se comparan las opciones considerando materiales y costos de mano de obra, para llegar a la solución más económica.

Sistema basado en el conocimiento

El sistema propuesto sigue las cuatro etapas precedentes. Como se mencionó antes, la determinación de la disposición de las cimbras tubulares es el punto donde la singularidad de la cimbra adquiere su más notable expresión, y, como tal, es también el núcleo del sistema propuesto. El resto de la descripción del sistema que sigue se centra en esta etapa.

La primera tarea del sistema es "leer" los planos de la estructura y proporcionar la información necesaria para establecer la figura geométrica. Esta figura es la forma y las dimensiones, tanto del elemento de concreto que ha de ser soportado, como del espacio en donde las bases tubulares han de ser colocadas. La figura geométrica es la identificación de objetos definidos como losa, viga, muro, columna, etc., y sus

coordinadas espaciales.

Para ser capaces de "leer" los planos y proporcionar esta clase de información, se utilizó un modelo orientado al objeto. El Modelo del Proyecto de Edificio (Building Project Model, BPM) fue desarrollado recientemente en el Instituto de Tecnología de Israel, Technion, en el marco de otro proyecto de investigación.⁴ El BPM se pone en práctica en una PC, utilizando un ambiente AutoCAD 13 como plataforma de desarrollo. Este modelo fue examinado en el curso del presente estudio, y se lo encontró adecuado, principalmente debido a que fue desarrollado con vistas a apoyar aplicaciones de ingeniería de la construcción, tal como la que se expone aquí.

Debe hacerse notar que un prerequisite para la generación automática de entrada de información de una estructura dada que aquí se propone, es que la estructura fue diseñada *a priori* utilizando el BPM: de otro modo, el diseño tiene que convertirse a partir de cualquier paquete CAD que se haya empleado, o de dibujos manuales. Sin embargo, esto es una limitación meramente técnica; cualquier otro modelo orientado al objeto utilizado en el desarrollo del sistema basado en el conocimiento aquí expuesto, proporcionaría esencialmente las mismas capacidades de generación automática de entrada de información.*

El sistema propuesto "leerá" los planos de la estructura para intensificar, por ejemplo, las vigas en un sistema losa-viga, y registrar la figura geométrica. Las funciones están escritas en AutoLISP++, que es una extensión AutoLISP creada dentro del desarrollo del BPM.

Una vez que la figura geométrica ha sido registrada por el sistema, está listo para empezar a operar el siguiente módulo, el cual proporciona soluciones de disposición de cimbras tubulares que se ajustan a las restricciones geométricas específicas. El cuerpo principal de conocimiento del sistema está representado por un conjunto de reglas. Cada regla corresponde a una situación específica definida por dos cláusulas: una restricción, que es la parte SI (condicional) de la regla, y una solución, que es la parte ENTONCES de la regla.

Por ejemplo: "SI hay vigas a desnivel en un sistema de losas soportadas por vigas en una dirección, ENTONCES, coloque filas de cimbra tubular debajo de las vigas, de modo que

coincidan las líneas centrales de las vigas y las filas de cimbra tubular.” (Razonamiento: se permite que las torres comunes estén cargadas únicamente a través de sus cabezas, y no a través de los largueros superiores de los marcos, a menos que estos largueros estén reforzados. Así pues, las vigas a desnivel tienen que ser manejadas separadamente de la losa que soportan.)

Otro ejemplo: "Si hay una losa con pendiente, ENTONCES determine la dirección de los largueros perpendicular a la dirección de la inclinación.” (Razonamiento: es preferible tener los largueros y no las viguetas colocados con una inclinación lateral, debido a que, a diferencia de las viguetas que descansan libremente en los largueros, éstos pueden ser asegurados a las cabezas en "U" de la torre).

Ejemplos que dan como resultado otras restricciones son columnas, escaleras con su armazón, niveles inferiores variables del elemento soportado, un contorno no ortogonal del elemento soportado y niveles variables del terreno o del piso.

Una vez que se ha considerado la combinación de las restricciones geométricas, restricciones de carga, condiciones de frontera, restricciones prácticas, así como la disposición básica (de cimbras tubulares uniformemente espaciadas, largueros en una dirección y viguetas en dirección perpendicular), el sistema puede generar una solución básica (figura 2), o más de una solución –es decir, inclusive antes de realizar un análisis estadístico para determinar los espaciamientos máximos permitidos de los varios elementos–. Los objetivos de las restantes etapas de diseño son entonces refinar las soluciones alternativas básicas, efectuando los algoritmos de análisis estático, y hacer una selección final con base en la evaluación económica. Estas últimas dos etapas son de una naturaleza más técnica, y se han tratado en estudios previos.³

Hay que subrayar que, debido a la naturaleza y al modo de operación de una herramienta de soporte de diseño inteligente, debe hacerse una clara distinción en el desarrollo de la herramienta, entre las etapas de diseño que siguen algoritmos generales (por lo regular inequívocos), y aquellas basados en juicios personales y experiencia adquirida de soluciones de casos particulares anteriores. De las etapas arriba señaladas, el análisis estadístico y la evaluación económica pertenecen a

la primera categoría, mientras que la disposición de las bases tubulares con respecto a la figura geométrica de la estructura es un ejemplo de la segunda categoría. Esta distinción es menos significativa cuando se emplean procedimientos de diseño no automatizados. Por ejemplo, las guías generales de diseño para cimbra tubulares, colocan una recomendación para "colocar largueros paralelos a la dimensión más grande del edificio" (experiencia), al lado de "el espaciamiento de las viguetas debe maximizar la capacidad del revestimiento de triplay" (algoritmo).

Modelo de datos de entrada

A fin de poder estimar el costo de cualquier solución, se requieren datos básicos sobre el material y la mano de obra. Mientras que es evidente que en cimbras tubulares de gran altura, las bases tubulares son el componente de costos más importante, puede ser menos obvio que dentro del costo total de las torres, el costo de la mano de obra constituye la porción más grande.

Si, por ejemplo, el precio de una torre de acero de 12 m de alto es 1,500 dólares, y se consideran 60 reúsos, entonces el costo del material de cada uso es aproximadamente 30 dólares, dependiendo de los valores utilizados para la vida económica y la tasa de interés. Para la misma torre, basándose en datos de entrada de trabajo de ocho horas para el montaje y desmantelamiento⁶ a 25 dólares por hora, el costo de la mano de obra es 200 dólares, es decir, 6.7 veces más que el del material. Si se toman en consideración otros factores de costo tales como los costos de mantenimiento, o si las bases tubulares son rentadas (lo que eleva el costo de cada uso), esta diferencia puede ser menor, pero aún así, la mano de obra será de al menos de cuatro a cinco veces más cara que el material.

Por lo tanto, es bastante sorprendente, al menos desde este punto de vista, que casi no se encuentren en ninguna parte datos de entradas de trabajo en el montaje y desmantelamiento de las bases tubulares. Consecuentemente, hay mucha incertidumbre al obtener costos de mano de obra para tal cimbra, y en particular para las bases tubulares que se elevan por encima de lo común, de 4 a 5 m. De ahí la importancia de los datos de entrada de trabajo.

Para resolver el problema de la carencia de datos de entrada , y por otro lado, para vencer la dificultad de realizar numerosos estudios de trabajo para diferentes configuraciones de torres y varias alturas en el rango de 3 a 30 m, se desarrolló un modelo de datos de entrada .⁶ Se analizaron los trabajos básicos de montaje y desmantelamiento de cimbras tubulares y se dibujaron líneas de regresión para ciertos tipos de torres, con base en los estudios de trabajo realizados para un número relativamente pequeño de alturas.

La figura 3 muestra como ejemplo la curva de entrada de información de trabajo en el montaje y desmantelamiento (o línea de tendencia) para cierto tipo de bases tubulares de aluminio. Se realizaron estudios de tiempo para este tipo de cimbras tubulares para seis alturas diferentes, de una a seis hileras de torres, correspondiendo de 2.8 a 11.2 m . El análisis de los resultados mostró que es más correcto considerar las entradas de trabajo en las cimbras tubulares en términos de hileras y no de altura, porque el número de hileras afecta las entradas de información de trabajo más que la altura. Ejemplos de entradas de trabajo en el montaje y desmantelamiento de las bases tubulares de aluminio: seis horas de trabajo para una torre de seis hileras, según se obtuvo mediante estudios de trabajo; 10 horas de trabajo para una torre de ocho hileras (15 m de altura), según se obtuvo con el modelo.

La línea de tendencia mostrada en la figura 3 es una superposición de entradas de trabajo de montaje y desmantelamiento. Para ciertos propósitos, puede ser útil utilizar únicamente la curva, ya sea del montaje o del desmantelamiento (por ejemplo, para estimar el tiempo que tomaría levantar un número dado de torres).

En la tabla 1 se dan los datos de entrada de trabajo para dos tipos de cimbras tubulares que se han obtenido hasta la fecha. Existen diferencias claras entre los dos tipos de torres. Los resultados están siendo utilizados en otro proyecto de investigación para estudiar los factores que afectan los datos de entrada de datos, tales como configuración de las torres, peso de los componentes y métodos de ensamblado.

Debe notarse que los datos de entrada de información de trabajo obtenidos son considerablemente más altos que los datos comúnmente anunciados por los fabricantes de cimbra tubular. Una razón es que los tiempos registrados dentro del

estudio actual relacionan no sólo el trabajo directo de montaje/desmantelamiento, sino también varios trabajos preparatorios (tales como el aceitado de los gatos de tornillo y la marcación de la localización de las bases de los elementos tubulares en el piso), así como también el aplomo y nivelación fina.

Reconocimiento

Esta investigación fue apoyada por el Fondo para la Promoción de la Investigación en el Instituto de Tecnología de Israel, Technion. El autor agradece a R. Sacks por compartir información sobre el Modelo del Proyecto de Edificios. La asistencia de computadora para esta investigación fue proporcionada por el estudiante graduado L. Lakhovsky.

Referencias

1. "Doka Floor Formworks System d2", catalog núm. 07/96 y Deutsche Doka Schalungstechnik GmbH, Maisach, Alemania, 1996, p. 10.

2 M.K. Hurd, *Formwork for concrete*, 6ª. ed., SP-4, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995.

3.A. Shapira, "Formwork design for high elevated slab construction", *Construction Management and Economics*, vol. 13, núm. 3, mayo de 1955, pp. 243-252

4.R. Shacks y A. Warszawski, "A project model for an automated building system: Design and planning phases", *Automation in Construction*, vol. 7, núm. 1, diciembre de 1997, pp. 21-34.

5.R.S. Johnston, "Design Guidelines for Formwork Shoring Towers", *Concrete Construction*, vol. 41, núm. 10, octubre de 1966, pp. 743-747.

6. A. Shapira y D. Goldfinger, "Work inputs in shoring tower-based formwork for high elevated concrete elements", *Research Report* 017-547, National Building Research Institute, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 1996.

* Puede obtenerse información adicional respecto al BPM dirigiéndose a Rafael Sacks, en el Instituto Nacional de Investigación de Edificios, Technion City, Haifa 32000, Israel,

fax: +972-4-8324534, e-mail: cvsacks@tx.technion.ac.il.

Aviad Shapira es miembro del Comité 347 del ACI, conferencista Senior del Instituto de Tecnología de Israel, Technion, e investigador Senior en el Instituto Nacional de Investigación de Edificios en Haifa, Israel.

Este artículo fue publicado en *Concrete International* y se publica con la autorización del American Concrete Institute

(Ilustraciones:)

Figura 1. Cimbra tubular para una losa con un gran claro .

Figura 2. Ejemplo de una disposición de bases tubulares generado por el sistema.

Figura 3. Modelo de entradas de información de trabajo de montaje y desmantelamiento



Concreto de Alto Desempeño

Adam Neville y Pierre-Claude Aïtcin

Aquí! 

En los últimos años, la expresión concreto de alto desempeño y la sigla HPC se han puesto de moda. Pero, ¿qué es exactamente lo que significa esto? ¿Es el concreto de alto desempeño un material realmente diferente del "concreto simple"? ¿O se trata de un concreto que es apropiado para una situación particular? El propósito de este estudio es explorar el amplio uso del concreto de alto desempeño y colocar este material en lo que nosotros consideramos una perspectiva apropiada.

Por mucho que los que tienen que ver con el concreto y las estructuras de concreto estén satisfechos con este material y lo manejen satisfactoriamente, es un hecho que, en los últimos 50 años, no se han visto cambios verdaderamente revolucionarios. Es cierto que actualmente utilizamos una gran variedad de aditivos, así como inclusores de aire, y que hemos extendido el rango de materiales cementantes de la mezcla. Sin embargo, los cambios en nada se parecen a los cambios revolucionarios que han tenido lugar en las telecomunicaciones, o inclusive en los motores de los automóviles. Pero este estudio no tiene el propósito de mirar hacia atrás ni de ofrecer una revisión histórica, excepto en lo que respecta al concreto de alta desempeño y su aparición en la escena del concreto. Esto equivale a reconocer que, aproximadamente en los últimos 15 años, han aparecido algunos nuevos conceptos en el campo del concreto y que puede darse por sentado que han llevado al advenimiento del concreto de alto desempeño.

¿Qué es el concreto de alto desempeño?

Empecemos por definir el concreto de alto desempeño. Puede argumentarse que la expresión "concreto de alto desempeño" no es muy afortunada. Es como hacer la publicidad de un nuevo producto, pero en la mayoría de los aspectos, el concreto de alto desempeño no es

Resumen

A partir de la perspectiva de que el concreto de alto desempeño no es un material distinto en esencia del concreto usado en el pasado, dos prestigiosos especialistas exponen las características que lo diferencian y le dan especificidad. Además de tratar aspectos clave de su elaboración y puntualizar las enseñanzas que ésta deja, formulan la predicción de que en el futuro la distinción que hoy se hace desaparecerá y sólo habrá concreto, es decir, concreto de buena calidad.

fundamentalmente diferente del concreto que hemos estado empleando, porque no contiene ningún ingrediente nuevo, y no involucra nuevas prácticas en la obra. De hecho, el concreto de alto desempeño evolucionó gradualmente durante los últimos 15 años, más o menos, principalmente por la producción de concreto con resistencias cada vez más altas: 80, 90 100, 120 MPa, y a veces inclusive mayores. Hoy día, en algunas partes del mundo pueden producirse de manera rutinaria resistencias de 140 MPa, pero el concreto de alto desempeño no es lo mismo que el concreto de alta resistencia. El énfasis ha cambiado de una resistencia muy alta a otras propiedades deseables en algunas circunstancias. Éstas son: alto módulo de elasticidad, alta densidad, baja permeabilidad y resistencia a algunas formas de ataque.

¿Cuál es entonces la diferencia entre el concreto de alto desempeño y el concreto usual? Hemos dicho que los ingredientes son los mismo en ambos casos, pero esto no es enteramente correcto. Primero, el concreto de alto desempeño con frecuencia contiene humo de sílice, mientras que el concreto ordinario por lo regular no lo incluye. Segundo, el concreto de alto desempeño generalmente, aunque no siempre, contiene ceniza volante o escoria de alto homo granulada y molida (o escoria, para abreviar), o ambos materiales. Este agregado debe ser escogido cuidadosamente, y tiene un tamaño máximo más pequeño que en el caso del concreto ordinario: en el concreto de alto desempeño, el tamaño máximo es, por lo regular, de 10 a 14 mm. Existen dos razones para esto. Primero, con un tamaño máximo más pequeño, los esfuerzos diferenciales en la interfase de la pasta agregado-cemento –lo que podría llevar al microagrietamiento– son menores. En segundo lugar, las partículas de agregado más pequeñas son más fuertes que las grandes. Esto se debe al hecho de que la trituración de la roca remueve las imperfecciones más grandes, que son los que controlan la resistencia.

Otro punto acerca de los ingredientes: la baja relación agua/cemento y la inclusión de humo de sílice en la mezcla requieren el uso de un superfluidificador. No es suficiente utilizar cualquier superfluidificador con cualquier cemento portland. El superfluidificador debe ser compatible con el cemento que se está empleando. El problema de la compatibilidad se discute más adelante en este artículo, pero

en esta etapa se imponen algunos comentarios generales, desafortunadamente críticos, acerca de la publicidad de los cementos portland.

Es indudable que ciertos fabricantes de cemento tienen un excelente conocimiento de éste, pero algunos de ellos no están bien informados acerca de las necesidades del productor de concreto y del contratista del colado del concreto. Ellos se ven inclinados a decir que el cemento portland es un excelente producto que siempre cumple con los estándares nacionales, que no es asunto del usuario indagar las propiedades físicas y químicas detalladas del cemento. Las únicas excepciones "permitidas" son la clasificación del tipo de acuerdo con el ASTM, o la clasificación de resistencia europea, y también otras características generales tales como alta resistencia temprana, bajo calor de hidratación o bajo contenido de álcalis. Por ejemplo, en el Reino Unido, en el pasado, los precios del cemento eran fijos y el fabricante desanimaba fuertemente al comprador cuando éste quería seleccionar las entregas de una planta particular de cemento. La actitud de mercadeo era: todos nuestros cementos portland ordinarios son igualmente excelentes. Inclusive hoy, en la mayoría de los países, no es rutinariamente posible asegurar que las entregas sucesivas de cemento sean de la misma planta, y mucho menos que sean de la misma dosificación de producción. La única excepción tiene lugar en el caso de grandes entregas en bruto, para proyectos muy grandes, circunstancia en la que es posible la negociación. Por supuesto, desde el punto de vista comercial, esta actitud es comprensible.

Sin embargo, con los cambios en el ambiente económico, las actitudes se han modificado. A pesar de ello, muchos fabricantes de cemento todavía exhiben un excesivo desinterés por las necesidades específicas del usuario del concreto. Se admite que la mención de los aditivos ya no provoca la respuesta: "el mejor aditivo es más cemento portland". Sin embargo, el desinterés habitual de muchos fabricantes de cemento no ayuda mucho cuando el productor de concreto desea hacer concreto de alto desempeño: él compra cemento portland de una fuente y el superfluidificador de otra. La unión de estos dos puede ser muy desafortunada.

Proporciones de mezcla del concreto de alto desempeño

Puede ser útil dar una idea de las proporciones típicas de la mezcla del concreto de alto desempeño. Usualmente, se emplea cemento del tipo I (en la clasificación del ASTM), pero si se requiere alta resistencia temprana, puede utilizarse el cemento tipo III. Además, ya hemos dicho que también se incluyen otros materiales cementantes en la mezcla. El contenido total de los materiales cementantes es muy alto: 400 a 550 kg/m³. La masa del humo de sílice, cuando se utiliza, representa de 5 a 15 por ciento de la masa total del material cementante, siendo 10 por ciento lo más típico. La dosis del superfluidificador es de 5 a 15 l/m³ de concreto. La dosis real requerida depende del contenido de los sólidos activos en el superfluidificador líquido, de la "reactividad" del cemento, la cual, a su vez, es una función del contenido de C3A y su forma polimorfa, y de la cantidad de sulfatos de álcalis, así como de algunos otros factores. Esta dosis permite una reducción del contenido de agua de 45 a 75 litros por metro cúbico de concreto. El valor de la relación de la masa del agua con la masa total del material cementante se ubica, generalmente, entre 0.35 y 0.25, pero se ha empleado inclusive un valor tan bajo como 0.22.

En la práctica, las proporciones de la mezcla varían, dependiendo de las propiedades de los ingredientes individuales y de las propiedades deseadas del concreto en servicio. En la tabla 1 se muestran los detalles de algunas mezclas reales utilizadas en el pasado. Las propiedades de los ingredientes de la mezcla se tratan más adelante.

Como ya se dijo, el agregado no debe tener un tamaño máximo muy grande. El agregado grueso tiene que tener cierto número de características: debe ser fuerte y estar absolutamente limpio, es decir, libre de arcilla o polvo adherido. No debe contener sílice reactivo y tiene que ser equidimensional en su forma, es decir, ni rajuelado ni alargado. Con muy pocas excepciones, se utiliza agregado triturado. En cuanto al agregado fino, debe tener una granulometría gruesa, preferentemente con un módulo de finura de 2.7 a 3.0. Vale la pena recordar que, a fin de alcanzar el buen empacamiento de las partículas finas en la mezcla, a medida que el contenido de cemento se incrementa, el agregado fino tiene que hacerse más grueso.

Consideremos ahora la inclusión de ceniza volante y escoria en la mezcla. Antes que nada, estos materiales

generalmente son más baratos que el cemento portland. En segundo lugar, se hidratan o reaccionan químicamente un poco más tarde que aquél. En consecuencia, desarrollan más lentamente el calor de hidratación. Esto significa que la elevación muy temprana de la temperatura del concreto es un poco menor. Inclusive una pequeña reducción en la temperatura máxima es importante, ya que con los contenidos de cemento verdaderamente empleados en el concreto de alto desempeño, la elevación de la temperatura en el centro de una sección masiva puede ser de 50 °C o inclusive mayor. Lo que importa, por supuesto, no es la temperatura máxima como tal, sino el gradiente de temperatura entre el centro y la superficie del elemento de concreto, el cual se da generalmente a una temperatura moderada. Se ha sugerido¹ que si el gradiente de temperatura no excede los 20 °C por metro, entonces no ocurrirá agrietamiento térmico debido al enfriamiento diferencial.

Existe otra razón de la conveniencia del uso de ceniza volante, y esto tiene que ver con la pérdida de revenimiento del concreto fresco. Puesto que estos materiales reaccionan sólo muy poco durante las primeras horas, no contribuyen a la pérdida de revenimiento, de modo que se necesita utilizar menos superfluidificador. En otras palabras, la cantidad de superfluidificador necesaria para asegurar una trabajabilidad adecuada está regida sólo por el contenido de cemento portland. Por otro lado, las mezclas que tienen más ceniza volante o más escoria desarrollan una resistencia menor, digamos, entre las 12 y 24 horas, que cuando todo el material cementante es cemento portland. Pero esto puede compensarse reduciendo la relación entre la masa de agua y la masa total de los materiales cementantes. De aquí se sigue que, antes de decidir sobre el uso de estos materiales, el diseñador estructural debe establecer la edad a la cual es necesaria una resistencia dada. Debe estar también familiarizado con la tecnología del concreto.²

La cuestión del uso de fluidificadores es importante en su conjunto, porque son un ingrediente muy caro en la mezcla, y sin embargo, deben incluirse en la misma. El humo de sílice es también muy caro. En muchos países, un kilogramo de humo de sílice cuesta tanto como 10 kg de cemento portland. Así pues, consideremos si es necesario o no el humo de sílice.

Al decidir si hay que utilizar o no humo de sílice, nosotros guiamos por la experiencia:3 se encontró que mezclas sin humo de sílice alcanzaban una resistencia a la compresión a 28 días de hasta aproximadamente 90 MPa, si bien con alguna dificultad. Para obtener una resistencia más alta, debe incluirse humo de sílice en la mezcla. Como ya se dijo antes, el contenido óptimo de humo de sílice es de aproximadamente 10 por ciento de la masa de cemento.

De lo anterior se desprende que, si en vez de hacer el concreto de 90 MPa, lo hacemos de 100 MPa, tenemos que utilizar humo de sílice. Debido al precio 10 veces más alto de este último, la adición de 10 por ciento de humo de sílice a la mezcla duplica el costo del material cementante. Esto representa un incremento muy grande del precio del concreto.

Sin embargo, debemos recordar los beneficios que se obtienen al emplear humo de sílice. No solamente es un material con alto contenido puzolánico, sino también es un polvo extremadamente fino, cuyas partículas son aproximadamente cien veces más pequeñas que las del cemento. Las partículas del humo de sílice se empaquetan apretadamente contra la superficie del agregado, y se acomodan entre las partículas de cemento, mejorando así grandemente el empaquetado. De aquí se sigue que si hay muy poco humo de sílice, digamos menos de aproximadamente 5 por ciento, éste no es muy efectivo. Ahora bien, si hay demasiado, digamos más de 15 por ciento, no existe espacio entre las partículas de cemento para acomodar todo el humo de sílice, y algo de éste se malgasta. Malgastar un material tan caro no es una buena práctica en ingeniería.

Puesto que las partículas extremadamente finas de humo de sílice reducen el tamaño y volumen de los vacíos cerca de la superficie del agregado, la llamada zona de interfase (también conocida como zona de transición) tiene propiedades mejoradas con respecto al microagrietamiento y la permeabilidad. La adherencia entre el agregado y la pasta de cemento mejora, permitiendo que el agregado participe mejor en la transferencia de esfuerzo.⁴

No debemos dejar el tema de las proporciones de la mezcla del concreto de alta resistencia sin considerar la relación agua/cemento. Existen, de hecho, dos significados de esta

palabra. Nosotros hemos sabido durante 80 años que la relación agua/cemento es el factor que controla la resistencia, debido a que el volumen relativo del espacio originalmente ocupado por el agua determina el volumen total de la materia sólida en el concreto endurecido. En términos muy generales, mientras más alto sea el volumen del material sólido, mayor será la resistencia a la compresión. De ahí se sigue que, en el concreto de alto desempeño, al igual que en el concreto ordinario, la resistencia a, digamos, 28 días, es una función de la relación agua/cemento. Para este tiempo, la escoria habrá reaccionado en un grado significativo, y la ceniza volante aproximadamente un poco menos. Sin embargo, el alcance de la reacción de la ceniza volante es muy sensible a la efectividad del curado.

¿Pero cuál es la situación a 24 horas, o a dos o tres días? La ceniza volante y, en menor medida, la escoria ocupan sólo el volumen representado por su forma original, es decir, de polvo seco. De esto se sigue que la relación agua/cemento pertinente a la resistencia muy temprana es sólo aproximadamente la relación de la masa de agua respecto al cemento portland. Esta relación es mucho más alta que la relación de la masa de agua respecto a la masa de todos los materiales cementantes tomados en conjunto. Por esta razón, la inclusión de ceniza volante o escoria, a un contenido de agua dado en la mezcla, conduce a una menor resistencia muy temprana. La afirmación anterior es verdadera, no sólo para el concreto de alto desempeño, sino para todas las mezclas de concreto.

Compatibilidad entre el cemento portland y el superfluidificador

Al principio del artículo, dijimos que el concreto de alto desempeño no requiere un cemento especial, y que generalmente se emplea cemento portland tipo I. El problema es que el cemento y el superfluidificador deben adaptarse uno al otro, es decir, que no debe haber incompatibilidad entre los dos materiales. Esto requiere una explicación de cierta amplitud.

Antes que nada, debemos volver a exponer cómo un superfluidificador actúa para dar al concreto su alta trabajabilidad. Los superfluidificadores tienen moléculas grandes y pesadas, que se envuelven a sí mismas alrededor

de las partículas de cemento y les dan una carga eléctrica altamente negativa, de modo que se repelen unas a otras. Esto da como resultado la defloculación y dispersión de las partículas de cemento y, por lo tanto, una mejor trabajabilidad de la mezcla. La estructura fundamental de la pasta de cemento hidratado no se ve afectada, pero los superfluidificadores interactúan con aluminato tricálcico (C3A) en el cemento portland. Debemos recordar que el C3A es el primer componente del cemento que se hidrata, y esta reacción es controlada por el yeso agregado en la fabricación del cemento portland.

Así pues, tenemos la situación de que tanto el superfluidificador como el yeso pueden reaccionar con C3A. Aunque se requiere cierta cantidad de superfluidificador durante el mezclado a fin de lograr una trabajabilidad adecuada, es esencial que no todo el superfluidificador llegue a fijarse por el C3A. Tal fijación ocurriría si el yeso no liberara los iones de sulfato lo suficientemente rápido para reaccionar con el C3A. Cuando los iones de sulfato se liberan demasiado lentamente, se dice que el cemento portland y el superfluidificador son incompatibles. Así pues, en la práctica, el factor de control es la solubilidad del yeso en el cemento portland dado. El término "yeso" se emplea para describir el sulfato de calcio en el cemento portland, pero este sulfato de calcio puede existir en diversas formas, dependiendo de las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento. Éstas pueden ser: yeso, es decir el dihidrato de sulfato de calcio, hemihidrato y anhidrito. Cada uno de éstos tiene una tasa de solubilidad diferente. Además, la solubilidad del anhidrito depende de su estructura y origen. En la práctica, la situación es todavía más complicada. Los estándares nacionales para cemento portland generalmente especifican un contenido máximo de SO₃ en el polvo de cemento acabado; por ejemplo, para el cemento tipo I, el Estándar C150-94 del ASTM especifica el contenido máximo de SO₃ en 3.0 o 3.5 por ciento, dependiendo del contenido de C3A.

El punto crucial es que no es el yeso agregado durante el molido del clinker, sino el contenido de SO₃ del cemento, lo que está limitado por la norma del ASTM. Ahora bien, con frecuencia existe otra fuente de SO₃ en el cemento, y es precisamente el sulfuro del carbón, o, posiblemente, el aceite utilizado en el horno de cemento. Tal sulfuro está a menudo presente porque el carbón, el coque de petróleo o el aceite,

que son más baratos y tienen todos un alto contenido de sulfuro, son los que se utilizan para hacer el cemento. Lo que sucede es que el sulfuro en el combustible reacciona con los óxidos de álcali volátiles en el horno para formar los sulfatos de álcali. Estos sulfatos son altamente solubles.

De lo anterior se desprende que dos cementos portland pueden tener el mismo contenido total de sulfato, pero, dependiendo del origen de éste, habrá disponible más o menos sulfato para reaccionar con C3A en las etapas iniciales. Si hay demasiado poco sulfato soluble disponible, los extremos del sulfonato del superfluidificador llegan a estar fijos y no hay superfluidificador disponible para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. Esta es la razón de que, con frecuencia, se agregue algo del superfluidificador después de la operación inicial de mezclado, pero esto puede no ser suficiente, además de que complica el proceso de mezclado.

El problema de la compatibilidad puede resolverse rápidamente, porque se ha establecido que para cada cemento portland existe una cantidad óptima de álcalis solubles (es decir, los que existen como sulfatos de álcalis) que asegura la compatibilidad con un superfluidificador dado. Es de esperarse que la práctica de comprar el cemento portland como un artículo y el superfluidificador como un segundo artículo independiente termine pronto; la armonización de parejas de cemento y superfluidificador estará más disponible, reduciendo así las pruebas laboriosas antes de su empleo.

El problema de la incompatibilidad que acaba de describirse puede existir también en el concreto ordinario, pero es mucho más agudo en el concreto de alto desempeño. Existen dos razones para esto. Primero, en el concreto de alto desempeño, la relación agua/cemento es muy baja, de modo que hay menos agua disponible para aceptar los iones de sulfato. En segundo lugar, debido a que el contenido de cemento portland por metro cúbico de concreto es muy alto, hay mayor presencia de C3A, cuya reacción debe ser controlada para asegurar la trabajabilidad deseada.

Hay un punto que debe destacarse: el comportamiento del cemento a una relación agua/cemento alta no nos dice lo suficiente acerca de su comportamiento a relaciones muy bajas de agua/cemento. La mayor parte de las pruebas

estándar, por lo tanto, no son lo suficientemente buenas para asegurar un comportamiento satisfactorio del cemento en el concreto de alto desempeño. Por esto es que se requieren pruebas especiales de compatibilidad. Pueden requerirse también pruebas especiales para valorar el comportamiento del concreto con relaciones de agua/cemento de 0.35 o inclusive más bajas, y éstas son las relaciones de agua/cemento utilizadas en el concreto de alto desempeño.

La contracción del concreto de alto desempeño y el curado

El concreto puede sufrir diferentes tipos de contracción, generalmente relacionados⁶ pero aquí nos interesa específicamente el concreto de alto desempeño. Primero, existe una contracción del concreto mientras aún está en el estado plástico. La magnitud de esta contracción, llamada contracción plástica, se ve afectada por la cantidad de agua perdida por la superficie expuesta del concreto. Si la cantidad perdida por área unitaria excede la cantidad de agua que llega a la superficie por el sangrado, puede ocurrir agrietamiento por contracción plástica. El concreto de alto desempeño tiene un muy bajo contenido de agua (expresado en litros por metro cúbico de concreto), y los poros capilares que se están desarrollando son, consecuentemente, muy pequeños. Por lo tanto, virtualmente no existe sangrado, y esto llevará al agrietamiento por contracción plástica, a menos que pueda evitarse la pérdida de agua de la superficie del concreto. De ahí la necesidad de curado húmedo desde el momento más temprano posible.

El segundo y mejor conocido tipo de contracción es la contracción por secado del concreto endurecido. Es esto lo que se considera simplemente como "contracción". La causa de la contracción por secado es la pérdida de agua por evaporación hacia el exterior del concreto. En el concreto de alto desempeño, hay muy poca contracción por secado, en parte porque los capilares son muy pequeños. Pero existen otras razones; la principal es que gran parte del agua ha dejado ya los capilares debido a la autodesecación. Esto puede causar una contracción autógena. Este es, pues, el tercer tipo de contracción. La contracción autógena es la consecuencia de la hidratación continua del cemento en toda su masa, y no solamente cerca de la superficie. Esta contracción es alentada por la baja relación agua/cemento y, por lo tanto, un número menor y un tamaño más pequeño de

los capilares. El humo de sílice, que reacciona muy pronto, agota rápidamente el agua y también contribuye a la autodesecación.

Una consecuencia importante de la contracción autógena en el concreto de alto desempeño es el desarrollo de microagrietamiento interno en toda la masa de concreto, y esto puede y debe evitarse por medio del curado húmedo. Nosotros debemos saber, aun cuando con frecuencia no practiquemos la regla, que es muy importante curar todo el concreto, y más todavía cuando la relación agua/cemento es baja. En el caso del concreto de alto desempeño, es esencial el curado húmedo desde el momento más temprano posible, y debe continuarse hasta que la resistencia a la tensión de la pasta de cemento que se está hidratando sea lo suficientemente alta para resistir el microagrietamiento interno.

Debemos manifestar muy claramente que el curado con membrana no es lo suficientemente bueno en el caso del concreto de alto desempeño. Todo lo que hace el curado con membrana es evitar la pérdida de agua del concreto. Esto es suficientemente bueno cuando la relación agua/cemento es mayor de aproximadamente 0.42, debido a que la cantidad de agua en la mezcla es adecuada para una hidratación total. Sin embargo, a valores muy bajos de relación agua/cemento en el concreto de alto desempeño, es esencial que ingrese agua adicional del exterior hacia el concreto. Se admite en algunos casos que el curado inmediato por niebla o el recubrimiento de la superficie de concreto con agua por medio de inundación puede ser impracticable. Lo que debe hacerse entonces es aplicar temporalmente una membrana, durante algunas horas cuando mucho, o emplear un nuevo tipo de aditivo llamado "retenedor de agua," de modo que evite el desarrollo de agrietamiento por contracción plástica. Pero tan pronto como haya ocurrido hidratación significativa, es esencial que ingrese dentro del concreto agua del exterior. Esto puede hacerse colocando mantas de yute premojadas o geotextiles premojados cubiertos con hojas de plástico, con una manguera perforada debajo del plástico que pueda mantener la manta permanentemente mojada.

La hidratación del cemento en el concreto de alto desempeño es muy rápida y, si se le permite que continúe ininterrumpidamente por medio de un constante suministro de

agua de curado, no se formarán meniscos en los poros capilares, y no habrá contracción autógena, por lo menos cerca de la fuente externa de agua, es decir, la zona expuesta de la superficie del miembro de concreto. Así pues, con un curado realmente bueno, no habrá virtualmente contracción autógena ni contracción por secado. Admitimos que, si en una fecha posterior se permite que la superficie de concreto se seque completamente, habrá contracción por secado, pero para entonces, la resistencia a la tensión del concreto será lo suficientemente alta para que no ocurra agrietamiento por contracción. Vale la pena recordar que no es la contracción en sí lo que importa, sino únicamente el agrietamiento por contracción.

Se ha dedicado gran parte de este artículo al tema del curado, pero creemos que esto vale la pena: el uso exitoso del concreto de alto desempeño tiene como condición observar los requisitos simples de curado. No tiene ningún caso usar materiales excelentes y fracasar en el producto final.

Cuándo utilizar concreto de alto desempeño

Al principio de este artículo expresamos el punto de vista de que el concreto de alto desempeño no es un material fundamentalmente distinto del concreto ordinario, sino un concreto adaptado para un propósito dado. Las necesidades específicas son variadas.

La necesidad prioritaria era obtener un concreto de alta resistencia. Esta resistencia puede ser requerida a una edad muy temprana, a fin de poner la estructura en servicio. Con mayor frecuencia, sin embargo, la alta resistencia se requiere a la edad de 28 días o más tarde. Una exigencia relativamente común de alta resistencia es en los miembros a compresión. Aquí, la alta resistencia permite el uso de columnas más delgadas y, por ende, una reducción en el peso, y consecuentemente, una carga menor en los cimientos. Además, una parte pequeña del área horizontal es ocupada por columnas, de modo que hay más espacio de piso económicamente valioso. En miembros a flexión, los beneficios de la alta resistencia son más difíciles de explotar. Una razón para esto es el problema del agrietamiento en la zona de tensión de una viga, debido a que la resistencia a la tensión no se incrementa en proporción a la resistencia a la

compresión. Otra dificultad reside en las limitaciones impuestas por los reglamentos de diseño existentes, pero éstos probablemente desaparecerán en el futuro.

Puede también requerirse concreto de alta resistencia, no por sí misma, sino porque el concreto de alta resistencia tiene un módulo de elasticidad más alto. Esto tiene importancia con respecto a la deformación de los miembros estructurales.

Un uso particularmente importante del concreto de alta resistencia es en el aseguramiento de una permeabilidad muy baja del concreto. Esto es esencial en condiciones de exposición severa donde hay peligro de que ingresen al concreto cloruros o sulfatos, u otros agentes agresivos. Estas condiciones existen en muchas partes del mundo donde es común el deterioro rápido del concreto.

Nos gustaría hacer un comentario general acerca del concreto. Las dos condiciones que conducen a mayor daño son el movimiento de agua y el cambio de temperatura. Nos estamos refiriendo al "movimiento de agua" porque, si un miembro de concreto está totalmente inmerso en agua libre de aire, inclusive agua de mar, ocurrirá un daño muy pequeño. Por otro lado, la alternancia de periodos de mojado rápido y secado prolongado es particularmente dañina. Lo mismo puede decirse de un cambio cíclico de temperatura. Existe una sinergia entre ambos: es probable que una combinación de mojado y secado reiterados con una temperatura que se altera frecuentemente cause un daño considerable. El concreto de alta resistencia con una permeabilidad muy baja asegura una larga vida de la estructura expuesta a tales condiciones.

Debemos subrayar el hecho de que la durabilidad es un problema no sólo en condiciones extremas de exposición. El dióxido de carbono está siempre presente en el aire, y más significativamente en las ciudades. La carbonatación resultante del concreto en la zona de recubrimiento puede destruir la pasivación del refuerzo y producir corrosión. A veces hay sales agresivas presentes en el suelo. La superficie del concreto puede estar sometida a abrasión.

El concreto puede, a veces, estar sometido a ciclos repetidos de congelación y deshielo. La autodesecación temprana significa que hay poca agua libre en el interior del

concreto, de modo que, por lo regular, no hay formación destructora de hielo.⁷

Tenemos que admitir, sin embargo, que hay algunas situaciones en donde la muy baja permeabilidad del concreto de alto desempeño es desventajosa. Esto es así en el caso del fuego, el cual da como resultado un incremento rápido de la temperatura del concreto. Debido a la muy baja permeabilidad, nada del agua presente dentro del concreto puede escapar lo suficientemente rápido; la presión de agua resultante puede causar rompimiento de la pasta de cemento y astillamiento del concreto.

Un punto muy importante es que no debemos preocuparnos únicamente por la resistencia del concreto, sino también por su durabilidad: puede decirse que el concreto que es apropiadamente durable es concreto de alto desempeño o simplemente "concreto de buena calidad".

Lecciones generales que se desprenden del concreto de alto desempeño

De acuerdo con nuestra tesis de que el concreto de alto desempeño no es una "especie" distinta de lo que nos gustaría llamar "buen concreto ordinario", se imponen algunos comentarios sobre este último. Gran parte del concreto producido en el mundo no es tan bueno como debería o podría ser. No carecemos del conocimiento para tener buenos resultados en la fabricación del concreto, y no necesitamos ninguna nueva investigación que nos ayude a hacer buen concreto. El concreto malo generalmente puede tener su origen en mano de obra deficiente o en malas prácticas de construcción. Nosotros creemos que el uso de concreto de alto desempeño nos puede enseñar cómo hacer concreto ordinario de buena calidad. Daremos aquí dos ejemplos.

Al principio de este artículo, pusimos gran énfasis en la importancia del buen curado. Establecimos muy claramente que el concreto de alto desempeño que no ha sido curado adecuadamente tendrá una calidad muy pobre. Por lo tanto, cualquier contratista que emplee concreto de alto desempeño tendrá que aprender a seguir los procedimientos de curado apropiados. Cuando, en alguna otra obra de construcción, este contratista esté colocando concreto ordinario, es muy

probable que continúe utilizando la buena práctica que ha aprendido. En otras palabras, él aplicará un buen curado. En el caso del concreto ordinario, es decir, concreto con una relación agua/cemento de, digamos, 0.45 o más, el buen curado puede tener algo menos de importancia, pero, sin embargo, mejorará el desempeño y la durabilidad de la estructura de concreto. Por desempeño, queremos significar ausencia de agrietamiento por contracción. Por durabilidad, queremos decir una baja permeabilidad del concreto en la zona del recubrimiento y, por lo tanto, la protección del acero de refuerzo contra la corrosión. En realidad, el agrietamiento por contracción es también dañino para la protección del acero de refuerzo.

En el caso del concreto ordinario, la importancia del buen curado está limitada principalmente al concreto de la zona del recubrimiento, pero las consecuencias de un curado inadecuado son importantes. No tiene caso tener un concreto muy bueno en el interior de un miembro estructural cuando el recubrimiento de concreto del refuerzo es de pobre calidad, de modo que la carbonatación del concreto se extiende rápidamente a través del espesor de la zona de recubrimiento, o los cloruros o sulfatos penetran desde el exterior en el concreto y tienen lugar reacciones destructivas, provocando agrietamiento, astillamiento y delaminación.

La segunda lección que hay que aprender del concreto de alto desempeño es mucho más general. Para hacer concreto de alto desempeño es esencial tener un control de calidad muy estricto de los materiales y procedimientos. Por ejemplo, la dosificación debe ser muy precisa; la cantidad de agua total, y no solamente la agregada, de cada dosificación debe ser la misma. La granulometría final del agregado no debe variar. ¡No es aceptable complacer al operario que coloca el concreto agregando otra cubeta de agua a la mezcla! Así pues, el productor de concreto debe desarrollar un sistema de producción de primera clase. Nuestra argumentación es que él debe (y probablemente lo haga) emplear el mismo sistema cuando esté haciendo concreto ordinario.

La primera reacción a esta propuesta puede ser que tan alto nivel de control de calidad cuesta dinero, pero creemos que no es dinero malgastado. Existen dos razones para apoyar nuestra opinión. Una es que un nivel más alto de control de

calidad da como resultado una variabilidad menor de las propiedades del concreto. Por ejemplo, la diferencia entre la resistencia promedio del concreto al ser producido y la resistencia mínima especificada es pequeña. Ahora bien, el precio está basado en la resistencia mínima, pero el costo está relacionado con la resistencia promedio. Para un mínimo dado, el tener un valor más bajo del promedio da como resultado una reducción de costos; esto es dinero que se ahorra en términos de contenido de cemento.

La segunda razón es que un proveedor de concreto que puede producir concreto de alto desempeño tiene una buena reputación, y esto es algo que se justifica, al ser considerado un buen proveedor de concreto. Consecuentemente, puede hacer más negocios con aquellos que se preocupan de la calidad en la construcción, aun si el precio por metro cúbico es un centavo o dos más alto que el de sus competidores, con quienes hay interminables disputas por la calidad de su trabajo. La resolución de estas disputas es costosa.

El futuro del concreto de alto desempeño

Es fácil para la gente de mayor edad "predecir" el futuro. Ellos pueden ser optimistas y escribir acerca del progreso y sobre los maravillosos desarrollos futuros sin correr ningún riesgo. Si al final de cuentas, resulta que se han equivocado, ya no estarán vivos para escuchar reproches. Si resulta que tienen razón, todos lamentarán la muerte de los viejos sabios. Así que nosotros daremos nuestros puntos de vista.

La clase aparte del concreto de alto desempeño desaparecerá, y el concreto de alto desempeño y el concreto ordinario se fundirán simplemente en el "concreto", es decir, concreto de buena calidad. Al mismo tiempo, el actual concreto de calidad deficiente hecho con una relación agua/cemento de 0.6 y más dejará de utilizarse estructuralmente, aunque, por supuesto, será útil para relleno, nivelación o para trabajos de jardinería por parte de personas que gusten del "hágalo usted mismo". Esperamos que la relación máxima de agua respecto al total de los materiales cementantes de la mezcla sea de 0.45 cuando mucho, y mucho más baja cuando la durabilidad sea un criterio importante. Esto no significa que el contenido de cemento portland en el concreto sea muy alto. Por supuesto, será probablemente más bajo que en la actualidad, porque

apenas si habrá mezclas que no contengan uno o dos materiales cementantes, así como también humo de sílice o metacaolín y varios tipos de rellenos. Yo espero que los fabricantes de cemento lleguen a darse cuenta de que ellos tienen un mejor futuro con menos cemento portland por metro cúbico, pero con más metros cúbicos de concreto en uso. Su reacción defensiva de oposición al empleo de otros materiales cementantes o rellenos, o inclusive de aditivos, que aún prosigue en muchos países, no corresponde a su mejor interés, y ciertamente no corresponde al interés de los usuarios del concreto, y eso significa todo el mundo.

Algunos de los materiales necesarios para hacer concreto de buena calidad son costosos. Esto es cierto, por ejemplo, si hablamos del humo de sílice. Y sin embargo, el humo de sílice es un producto de desecho de la fabricación de aleaciones de silicón a partir de cuarzo de gran pureza y de carbón en un horno eléctrico de arco sumergido. Se requiere muy poco procesamiento adicional para hacer que el humo de sílice sea utilizable en el concreto. Así pues, el precio del humo de sílice está regido por la demanda, y no por el costo de producción. Tal situación es absolutamente apropiada en nuestro sistema económico, pero esto da margen para materiales alternativos.

Uno de tales materiales es la cáscara de arroz, adecuadamente procesada de modo que produzca un humo muy fino con alto contenido de sílice. La cáscara de arroz existe en abundancia en muchos países, pero en la mayoría de éstos, las instalaciones para la transformación y el procesamiento son deficientes. Por otro lado, la demanda de un material puzolánico de muy buena calidad y muy fino se halla principalmente en los países industrializados. De manera que existe una desproporción. Sin embargo, esto se resolverá probablemente con la transferencia de tecnología, y un fabricante importante de cemento ya está involucrado en el desarrollo de instalaciones apropiadas para el procesamiento de la cáscara de arroz en Asia.

Los superfluidificadores también son caros debido al alto costo de la producción de moléculas grandes y pesadas, pero igualmente en este caso hay posibles maneras de reducir los costos. Por ejemplo, se han diluido superfluidificadores con lignosulfonatos reductores de agua,

que son más baratos. Sin embargo, esta situación está cambiando, debido a que las fábricas modernas de papel utilizan una tecnología que no proporciona lignosulfonatos utilizables como un subproducto, o producen lignosulfonatos con tantas impurezas que no pueden emplearse como reductores de agua en el concreto. Sin duda, el ingenio humano encontrará una manera de producir reductores de agua altamente efectivos y a un precio razonable.

Con todo, el costo de lo que hemos llamado "buen concreto" probablemente sea más alto que el costo del concreto actual con una alta relación agua/cemento. Este concreto, sin embargo, no es durable y, consecuentemente, con frecuencia requiere reparaciones y luego reparaciones a las reparaciones, y posiblemente su reemplazo. Todo esto cuesta dinero, aunque el costo inicial y el costo de las reparaciones y el mantenimiento puedan provenir de diferentes fuentes. Es lógico considerar el costo de todo el ciclo de vida, y nosotros estamos empezando a emplear este modo de ver las cosas. Una vez que sea plenamente apreciado el valor del costo del ciclo de vida, nosotros estaremos produciendo, en general, buen concreto.

El concreto, bueno, malo o regular, ha sido el material de construcción principal durante cerca de un siglo. Actualmente, en el mundo se está utilizando a una tasa anual de 1 m³ o 2.5 toneladas per cápita. No existe ningún competidor económicamente viable a la vista. Por lo tanto, podemos esperar que el concreto de alto desempeño, o simplemente el buen concreto, siga sirviendo al mundo durante un largo tiempo más.

Referencias

1. P.B. Bramforth, "In situ measurement of effect of partial portland cement replacement using either fly ash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass concrete", Proc. Inst. Civ. Engineers, Part 2, septiembre de 1980. pp. 777-800.
2. A.M. Neville, "Concreting technology / an essential element of structural design", Concrete International (1998).
3. P.C. Aitcin, High performance concrete, E & FN Spon, 1998.

4. A.M. Neville, "Aggregate bond and modulus of elasticity", ACI Materials Journal 4 (1), 1997, pp. 71-74.

5. A.M. Neville, Properties of concrete, 4^a. ed., Longman, 1995 y John Wiley, 1996.

6. P. Aïtcin, A.M. Neville y P. Acker, "Integrated view of shrinkage deformation", Concrete International 19 (9), 1997, pp. 35-41.

7. M. Pigeon y R. Pleau, Durability of concrete in cold climates, E & FN Spoon, 1995.

* HPC corresponde al inglés high performance concrete. (OJO: va al pie de la primera página).

Mayor información acerca de las mezclas: A (Estados Unidos); B (Canadá; (C) Canadá; (D) Estados Unidos; (E) Canadá; (F) Canadá; (G) Marruecos; (H) Francia; (I) Canadá.

*Se sospecha que el alto contenido de agua fue ocasionado por la alta temperatura ambiental en Marruecos

Este artículo fue publicado en Materials and Structures y se reproduce con la autorización de la RILEM



Posibilidades en el diseño de superficies de concreto

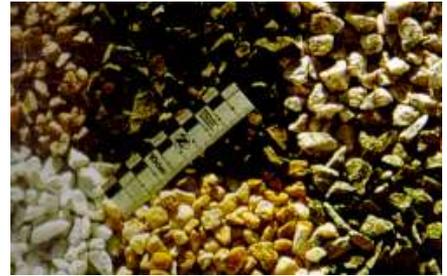
Ingeniero Martin Mölimann y doctor Jörg Nicolay

El deseo de dar un diseño decorativo a los edificios y de proveer de superficies decorativamente diseñadas a los componentes de construcción, no es sólo una tendencia de la moda. El diseño decorativo de los edificios es una cuestión de calidad de vida. El concreto, gracias a su plasticidad y funcionalidad casi ilimitados, brinda la oportunidad de una arquitectura creativa. El diseño de superficies de concreto puede, al mismo tiempo, ayudar, levantar, realzar, descomponer en detalles, la arquitectura de un edificio. Pero nunca puede reemplazarla.

Una superficie no tratada de concreto muestra, más o menos, la pasta de cemento endurecida, y está determinada, en primer lugar, por el color del cemento. Sin embargo, las superficies de concreto pueden también adquirir una forma, perfil o textura. Por medio del uso de moldes, se les puede dar formas especiales. Tratadas en los estados fresco, temprano o endurecido, se les puede dar perfil y textura y, dependiendo de los pigmentos y/o agregados que se le añadan, manifiestan su color.

El concreto y el color

Es sabido que los cementos comunes son grises: los cementos portland son de un gris suave, los cementos de escoria de alto horno, de un gris ligero, y los cementos portland con una gran resistencia a los sulfatos –debido a su composición–, de un gris oscuro. Además de éstos, tenemos un cemento portland de esquisto, el "Terrament," de color café rojizo. La más amplia variedad de diseño se abre con el cemento



Aquí! 

Resumen

La belleza que puede alcanzar un superficie de concreto no reconoce otros límites que los de la imaginación del diseñador, quien tiene en sus manos los recursos para transformar un material inerte y darle vida haciendo surgir en él forma, perfil, textura y color, casi como en un acto de magia.



blanco, el cual ha sido producido durante 60 años por Dyckerhoff en Wiesbaden y se vende en toda Alemania bajo la marca registrada "Dyckerhoff Weiss".

El cemento blanco puede ser la base para el concreto blanco así como para concretos coloreados al combinarse con pigmentos y/o agregados coloreados. La pasta de cemento ligeramente endurecida es, por un lado, la matriz ideal contra la cual el color resalta más, y por otro lado, es tan neutral al color en el caso de la coloración, que los pigmentos dejan una pasta de cemento endurecida limpia y vívida, cuyos colores no exhiben un velo gris. Inclusive los concretos a los que hay que colorear de negro, tienen una intensidad y una brillantez más oscuras con el cemento blanco que con un cemento gris.

Puesto que la parte volumétrica del agregado en el concreto es de aproximadamente 700 l/m³, entre 0 y más de 70 por ciento de la superficie puede determinarse por medio del agregado, dependiendo de la técnica de tratamiento. Además, son de interés especial los agregados naturalmente coloreados, los cuales, con sus colores y su superficie densa y resistente, influyen y codeterminan la apariencia exterior en cuanto a textura y color.

La paleta de colores de los agregados se extiende desde el blanco (piedra caliza y mármol), a través del amarillo, rojo, azul y verde, hasta el negro (basalto). Dependiendo de la técnica de tratamiento, el color natural inherente de los agregados puede resaltarse más o menos fuertemente.

El color de la pasta endurecida de cemento o el mortero muy fino se determina principalmente por el color de su dosificación, pero también por los pigmentos y, cuando están presentes, por los materiales aditivos así como por la fracción de polvo del agregado. Más allá de esto, la relación de agua en la dosificación influye en el color:



relaciones más altas de agua/cemento dan una pasta endurecida de cemento más clara, y relaciones más bajas, un color más oscuro, y con ello, efectos visuales de coloración más oscura. Por esta razón, es posible, en el caso de un enriquecimiento local de agua, llegar a veces a la formación de manchas en superficies de concreto con revestimiento claro. El cemento blanco, debido a su color más claro, es insensible en gran parte a esta influencia de claridad y oscuridad.

El color del cemento, por sí mismo, no influye en las propiedades técnicas de los productos. Los cementos coloreados, tales como el Dyckerhoff Weiss, son cementos estándar que hacen posible la fabricación de concreto durable y fuerte, con protección contra la corrosión y resistencia a las sales descongelantes mediante las normas de la tecnología del concreto.

Los cimbras determinan la superficie

Sin un tratamiento adicional, la superficie de concreto es el reflejo de la textura de la cimbra. Las cimbras suaves no absorbentes, tales como los paneles de triplay mejorados con resina sintética, o los paneles de acero, dan como regla general áreas visibles suaves, sin texturización.

Los cimbras de tablonc de madera, por ejemplo, los que están toscamente aserrados, sopleteados con arena, tratados al fuego, o los tablonc de madera cepillados, actúan controlando el agua como resultado de cierta absorbencia, y promueven un área uniforme correctamente revestida. Además de eso, las superficies de concreto pueden estructurarse y labrarse por medio de la textura del grano de la madera y por la disposición de las juntas. Sin embargo, se recomienda precaución con las maderas frescas, porque tienen, como regla general, componentes retardantes. Éstas deben ser "preusadas" por medio de una capa previa de lechada de cemento. Es también importante proteger la cimbra de madera contra el secado severo y contra la

exposición no uniforme a la radiación solar.

Se pueden crear superficies de concreto densas y uniformes por medio de los paneles para cimbras afelpadas "Zemdrain". Toda el agua excesiva en la superficie de concreto es absorbida –se disminuye así la relación agua/cemento– y además se quitan las inclusiones de aire.

Se puede obtener texturización y perfilado (con profundidades de perfil de hasta 10 cm) en las superficies de concreto, con las llamadas matrices de cimbras, es decir, hule de polisulfido o de silicón. Éstas se proveen como estructuras estándar o se producen por pedido especial según diseño y especificación. Un buen ejemplo de este tipo de diseño de superficies es el que se empleó en los trabajos de reparación del hotel de aguas minerales en Scheveningen. Los componentes desintegrados de piedra natural, restaurados por medio de yeso, sirvieron aquí como modelo para los moldes negativos de goma de silicón con los que se reconstruyeron los componentes de manera durable en concreto coloreado.

La adhesión entre el concreto y la cimbra se evita por medio de agentes descimbrantes. En cimbras no absorbentes, éstos se aplican en capas delgadas uniformes, al tiempo que se evitan absolutamente las concentraciones. En tablonos de madera absorbente, deben utilizarse aceites minerales con adición de agentes descimbrantes. Cuando se emplean matrices, el productor entrega agentes descimbrantes apropiados. Los agentes descimbrantes correctos son incoloros y no tienen polvo. Puede obtenerse la seguridad necesaria, especialmente en el caso de concretos muy ligeros, por medio de pruebas piloto.

Tipos de tratamiento de superficies

El concreto puede ser tratado en estado fresco, temprano o endurecido. Un tipo popular de tratamiento es el método de lavado con profundidades de remoción de 1 a 2 mm. El uso



del agregado en estos casos tiene una curva de granulometría continua. La superficie obtiene una textura que recuerda la arenisca. En el caso de lavado áspero, se utiliza un agregado de granulometría escalonada, y las partículas del agregado grueso son expuestas hasta justo abajo de la mitad de su profundidad. En el caso de superficies de concreto lavadas, dominan las superficies del agregado y su color natural.

Se quita mucho menos pasta de cemento con exposición de agregado cuando se utiliza ácido; la superficie sólo se vuelve artificialmente áspera. La superficie de concreto se vuelve más "severamente áspera" en comparación con un lavado fino cuando se emplea sopleteado de arena. Con este método, también se hacen ásperas las superficies del agregado y se obtiene un acabado mate. Los tipos de tratamiento mencionados remueven, por lo tanto, más o menos pasta de cemento endurecida, exponen las superficies del agregado pero lo dejan intacto, excepto por el efecto de aspereza.

Sin embargo, otros métodos de tratamiento crean nuevas superficies. Con los métodos de tratamiento del albañil, tales como tratamiento con hachuela y martelina, se quitan las superficies originales de concreto con la ayuda de diversas herramientas industriales o manuales, y se exponen la matriz y los agregados. Las texturas remanentes del tratamiento determinan la superficie y le dan su carácter individual.

Son extremadamente impresionantes, en interiores y exteriores, las superficies de concreto esmeriladas y pulidas. Por el interjuego de una matriz ligeramente coloreada y el agregado coloreado, se crea un acabado superficial interesante y vívido. Como resultado de su lisura, se minimiza la adherencia de la suciedad y el polvo. El esmerilado y el pulido de grandes elementos, columnas con una sección transversal circular, pero también elementos superficiales curvos, es actualmente materia de la tecnología

de vanguardia. El tratamiento incluye también las áreas frontales y se logran esquinas y bordes limpios.

Limpieza y tratamiento de las superficies

Los edificios de concreto son durables y tienen una larga vida. Sin embargo, inclusive las superficies de concreto –por muy lisas que estén– se ven bastante desmejoradas por el viento, la lluvia, el polvo y las partículas de la atmósfera. Es inevitable la contaminación y el envejecimiento gradual de las superficies de los edificios, pero todos los materiales de construcción de un edificio se ven afectados por igual. Por esta razón, el componente y el diseño de la superficie deben tomar en consideración las influencias previsibles, a fin de efectuar un proceso de envejecimiento uniforme.

Los antepechos de las ventanas deben drenar hacia la parte interior, es decir, detrás de la fachada, de modo que el agua de lluvia no deje manchas tras de sí. Hacia la parte inferior, los elementos con una ligera regresión son ventajosos: no ofrecen superficies de depósito a la suciedad. Además, los perfiles de las superficies acanalados verticalmente ayudan a que las manchas debidas al drenaje sean menos evidentes.

La contaminación también puede reducirse haciendo que las superficies de concreto sean repelentes al agua, ya sea durante la obra o después de haberse efectuado una operación de limpieza. El efecto colateral al hacer una superficie repelente al agua –es decir, el secado de la capa más externa de concreto– es que la carbonatación avanza ligeramente, y es insignificante en el caso de una ejecución correcta.

Más allá de eso, la superficie de concreto –inclusive si está coloreada– puede protegerse mediante una capa delgada y transparente de

metacrilato, un método que se aplica en las reparaciones para el propósito de "autolimpieza". La película es invisible, pero los colores se vuelven ligeramente más intensos. Si la brillantez de los colores de una fachada ha de mantenerse mucho tiempo, es inevitable la limpieza a intervalos regulares, por ejemplo, por medio de chorros de agua.

Los edificios de concreto tienen larga vida

Correctamente producido, el concreto es durable con respecto al efecto de la congelación, la protección contra la corrosión y el efecto positivo de las superficies diseñadas. El alfa y omega de la durabilidad es el grosor y la calidad del recubrimiento de concreto. Son importantes, especialmente, los centímetros más externos del edificio o del componente: aquí, el concreto debe tener el contenido exacto de cemento y la relación precisa de agua/cemento, y debe ser capaz de hidratarse suficientemente. De ser necesario, el diseñador debe especificar los efectos de la congelación y de las sales descongelantes.

En el tratamiento por remoción, tal como el lavado, el esmerilado o el sopleteado con fuego, la profundidad de la remoción debe ser adicionalmente tomada en cuenta al fijar el recubrimiento de concreto. En el caso de superficies críticas, es aconsejable incrementar la cantidad usual del recubrimiento de concreto, de 0.5 a 1 cm.

Aseguramiento de la calidad

A fin de expresar las ideas de estilo y construcción del cliente de manera apropiada en el diseño y planeación, y a fin de poder convertirlas en realidad en la obra, la especificación debe ser clara, amplia, pero también realizable. En la práctica, han probado ser de gran utilidad las visitas conjuntas a la obra y las discusiones de coordinación en el equipo de construcción, es decir, entre el cliente, el arquitecto y el personal



que ejecuta los trabajos de precolado del concreto. De este modo, se llega a un acuerdo conjunto, por ejemplo, en el color y la textura del concreto (cemento blanco, agregado coloreado, método de tratamiento). Con base en elementos de muestra correspondientemente preparados, es posible establecer, en efecto, los requisitos de manera detallada y escrita. También se recomienda, hasta donde sea posible, simplificar las condiciones frontera dentro de los límites logísticos y económicos, o considerar alteraciones, ya dentro de las condiciones frontera, y cómo compensarlas.

Una vez que los requisitos estén clara y ampliamente especificados, su conversión debe ser programada con precisión, antes de la ejecución. Para este propósito, deben establecerse medidas de aseguramiento de la calidad para cada área de responsabilidad, y deben establecerse las interfases.

Los requisitos que son sólo condicionalmente capaces de ser satisfechos, o que no son controlables, deben considerarse en todos los casos antes de empezar la construcción. Aquí entra la función importante de los consejeros de las fábricas de cemento y de la Asociación Federal de la Industria Alemana del Cemento. Si fuera necesario, en el caso de que los requisitos no se pudieran cumplir o en el caso de promesas no realistas, deben cooperar constructivamente para precisar lo que puede lograrse antes de empezar la ejecución, a fin de asegurar en todas las fases la coordinación entre el cliente, el diseñador y el constructor.

Este artículo se publicó en Concrete Precasting Plant and Technology

ILUSTRACIONES

1. La paleta de colores de los agregados se extiende desde el blanco, a través del rojo, verde y azul, hasta el negro.



2. El diseño decorativo de los edificios fue, y continúa siendo, una cuestión de calidad de vida. Aquí tenemos la Torre Romana en Colonia, decorada con "concreto romano".

3. El nuevo Instituto Wilhelm Dyckerhoff para la Tecnología de Materiales de Construcción en Wiesbaden. Éste es un ejemplo impresionante, por la función y la estética del concreto. Se dio especial atención al diseño de la fachada en elementos prefabricados de color pastel, finamente lavados en la mayoría de los casos.

4. El agua de lluvia ha dejado aquí manchas y rastros de escurrimiento debajo del punto de recolección. A fin de evitar esto, los antepechos de las ventanas deben drenar hacia el interior.

5. Los perfiles verticalmente acanalados de las superficies ayudan a evitar la formación de rastros de escurrimiento.

6. Un ejemplo impresionante de la diversidad de diseño del concreto. El Museo de Arte en Bonn.

7. En la reparación del hotel de aguas termales en Scheveningen, los componentes de construcción fueron reconstruidos de manera durable en concreto coloreado.

8. El esmerilado y el pulido de grandes elementos, columnas con una sección transversal circular o inclusive elementos superficiales con superficies curvas ha venido a ser, mientras tanto, parte de la tecnología de vanguardia.

9. Las superficies de concreto esmeriladas, tanto interiores como exteriores, son extremadamente impresionantes.

10. Con base en elementos de muestra preparados con antelación, pueden establecerse conjuntamente los requisitos en el equipo de construcción.

11. Un efecto elegante y espacioso creado por la



fachada, con una superficie esmerilada en el imponente edificio del hotel.

12. Ejemplos de diversas variantes de perfiles.