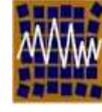




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

Nº A15-02 CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO TECNOLOGIA Y APLICACIONES

Ing. Carlos Fernández Ch. M.Sc.¹

1. *Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Diseñador Senior Holcim Costa Rica
San José, Costa Rica*
Carlos.fernandezc@holcim.com

RESUMEN

El concreto es uno de los materiales de construcción que históricamente ha sido utilizado más ampliamente alrededor del mundo. Desde inicios de los años 1900 se empezaron a utilizar los concretos con resistencias bajas o normales (17.5 MPa-30.0 MPa) sin embargo, en algunos casos estos han mostrado signos significativos de deterioro. Los concretos de Alto Desempeño con resistencias a la compresión en el rango de (65.0 MPa-85.0 MPa) fueron desarrollados en los años 80 y han sido mezclas tendientes a incrementar tanto la resistencia como la durabilidad. Los concretos de Ultra Alto Desempeño, inicialmente conocidos como Concretos con Componente Reactivo, fueron desarrollados en Francia a inicios de los años 90.

El Concreto de Ultra Alto Desempeño es un material innovador y que promete importantes aplicaciones en la industria de estructuras especiales de grandes luces (como en el caso de Puentes) y del Concreto Arquitectónico. Este nuevo material ha mostrado contar con resistencias a la compresión y a la tensión de alrededor tres veces y de seis veces respectivamente a las alcanzadas por concretos de Alto Desempeño utilizados típicamente en la industria del Concreto Prefabricado y Presforzado. Adicionalmente, este

nuevo material ha exhibido excepcionales características de durabilidad, limitada porosidad, virtualmente impermeable, prácticamente sin retracción, limitado flujo plástico y alta resistencia ante la corrosión.

Hoy día es posible apreciar un amplio número de ejemplos de aplicación alrededor del mundo, los cuales incluyen tanto estructuras para puentes (carreteros y de paso peatonal), estructuras de techo con cubiertas de concreto de espesores reducidos y sin refuerzo de cortante, como también elementos arquitectónicos de fachada con texturas de alta calidad e incluso esculturas de concreto. En la actualidad se cuenta con ejemplos de aplicaciones en vigas para puente construidas en 1997 y que están siendo monitoreadas desde sus inicios y cuyos resultados son favorables.

En la actualidad se cuenta con normas de diseño y producción de este tipo de concretos, las cuales inicialmente han sido desarrolladas en Francia en el año 2002, sin embargo existen una serie de proyectos de Desarrollo, Calibración e Implementación en países como Alemania, Suiza, Holanda, Korea, Canadá y más recientemente Estados Unidos.

Debido a su composición, a diferencia de los concretos convencionales o de Alto Desempeño, el comportamiento de estos concretos no solo exhibe una alta resistencia a la tracción, sino que cuenta con una alta capacidad de deformación a tensión a un esfuerzo sostenido que le permite contar con un comportamiento dúctil sin necesidad de contar con algún tipo de confinamiento por medio de estribos. Esta propiedad de alta ductilidad intrínseca del material, sumada a la posibilidad de contar con estructuras más livianas, permiten el considerar a los concretos de Ultra Alto Desempeño como un material apto, ventajoso y prometedor para aplicaciones en zonas sísmicas.

Palabras Claves: Ductilidad, micro-fibras, durabilidad, comportamiento, fatiga, rigidez, esbeltez.

1. INTRODUCCION:

La tecnología del concreto ha cambiado enormemente en los últimos años. Estos cambios se han dado como resultado de un mejor y mayor entendimiento de la micro-estructura del concreto. En este sentido, el Concreto de Ultra Alto Desempeño (CUAD) es un nuevo material que ya ha sido introducido en la industria de la construcción en un gran número de países. A diferencia de los concretos convencionales, en los CUAD no se utiliza agregado de gran tamaño (agregado grueso). El tamaño máximo de agregado grueso utilizado en este caso es típicamente del orden de los 600 μm . La resistencia a la compresión (f'_c) en este tipo de concretos ha sido reportada en rango de los 150 MPa hasta 600 MPa, con una resistencia a la flexión en el orden de los 20 MPa a 50 MPa.

Los Concretos de Ultra Alto Desempeño, también conocidos como Concretos con componente reactivo es una de las más recientes innovaciones de los materiales a base de cemento Pórtland con propiedades muy

superiores a las presentadas por los Concretos de Alto Desempeño (CAD), particularmente en lo que corresponde a su durabilidad (tabla 1).

Características del Material	CUAD comparado con CAD
Resistencia a Compresión	2-3 veces mayor
Resistencia a Flexión	2-6 veces mayor
Módulo de Elasticidad	1.5 veces mayor
Porosidad Total	4-6 veces menor
Micro-porosidad	20-50 veces menor
Permeabilidad	50 veces menor
Absorción	7 veces menor
Difusión de Cloruros	25 veces menor
Abrasión	2.5 veces menor
Velocidad de Corrosión	8 veces menor

Tabla 1. Comparación entre CUAD y CAD

La combinación de estas propiedades favorecen al diseñador estructural para crear secciones más delgadas y livianas, alcanzar claros mayores o estructuras más esbeltas, geometrías y formas más agradables e innovadoras y a la vez proveer una mayor durabilidad y una mayor resistencia contra la corrosión, la abrasión y el impacto. Adicionalmente para el caso particular de la industria del prefabricado, este nuevo material favorece el mejoramiento de productos existentes y la creación de nuevos productos de alta competitividad.

2. COMPONENTES DE LOS CUAD:

Los componentes de los CUAD incluyen cemento Pórtland de uso general, silica fume, polvo de cuarzo, arena fina, aditivo súper plastificante, agua y micro-fibras de acero (Figura 2.1). Cada uno de estos adicionado en la cantidad óptima contribuye en la obtención de sus extraordinarias propiedades de resistencia y durabilidad.

El cemento Pórtland al igual que sucede en concretos convencionales, es el pegamento que mantiene a todos los componentes juntos. Cuando este reacciona con el agua se inicia el proceso de hidratación. Desafortunadamente, el cemento Pórtland realmente perjudica la reducción de la porosidad del concreto,

lo anterior debido a que cuando el agua es adherida a la mezcla, la porosidad de los granos de cemento se incrementa. El tamaño de las partículas de cemento es del orden de $10-80 \mu\text{m}$.

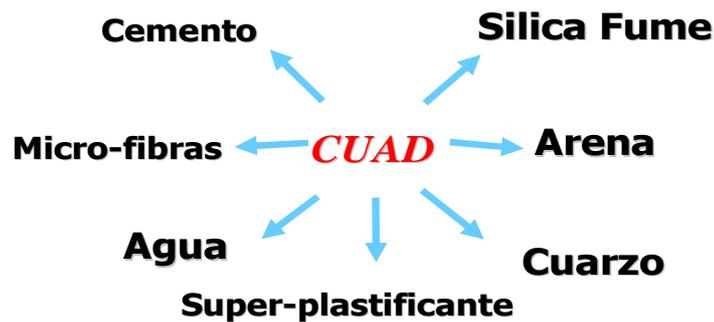


Figura 2.1 Componentes de los CUAD

La densidad del material es incrementada a través de la incorporación de partículas de menor tamaño bien distribuidas dentro de matriz granular. Es preferible el uso de partículas esféricas que mejoren la compacidad de la mezcla y a la vez mejoren la lubricación en el proceso de mezclado. Las partículas esféricas de silica fume rellenan los vacíos entre partículas de mayor tamaño incrementando la densidad de la mezcla y mejorando la trabajabilidad de esta. La silica fume tiene un diámetro promedio entre $0.1-0.2 \mu\text{m}$.

El polvo de cuarzo triturado es el componente reactivo de la mezcla. El beneficio que este brinda a la concreto es realmente su bajo costo y además es una excelente pasta de gran dureza. El diámetro de las partículas del polvo de cuarzo

Es del orden de $10-15 \mu\text{m}$.

La arena fina contribuye con las partículas de mayor tamaño en la matriz, el tamaño de la arena es seleccionado dependiendo del grado de homogeneidad que se desea. En el CUAD el tamaño de las partículas de arena es limitado a $600 \mu\text{m}$, pero no menor a $150 \mu\text{m}$. La arena fina puede ser tanto manufacturada como de tajo. Son preferibles las partículas con formas esféricas, lo anterior debido a que requieren menos cantidad de agua en la mezcla.

Una de las principales características de los Concretos de Ultra Alto Desempeño es la mínima cantidad de agua requerida en la mezcla sin que exista un sacrificio en la trabajabilidad de esta. Es requerido un porcentaje importante de súper-plastificante para vencer la floculación causado por las cargas eléctricas en la superficie de los granos de cemento. La razón de súper-plastificante requerida debe ser alta debido a la poca cantidad de agua utilizada en la mezcla.

La superior ductilidad de los CUAD es obtenida a través de la incorporación de micro-fibras de acero. Sin la adición de las fibras el concreto presenta un comportamiento completamente frágil. Debido a que las fibras refuerzan la mezcla a nivel micro se elimina la necesidad de colocar refuerzo por temperatura y retracción y a la vez permite la reducción y en algunos casos la eliminación por completo del acero para cortante. El tamaño de las fibras integradas en la mezcla es muy importante, tanto el grado de ductilidad como la resistencia a la tracción obtenidos dependen no solo del tamaño de las fibras (razón "l/d") sino también del porcentaje de fibras utilizado por m³. En algunos casos se han utilizado fibras de polipropileno con el fin de mejorar la resistencia al fuego.

El proceso de mezclado de los Concretos de Ultra Alto Desempeño es de mayor duración que para el caso de concretos convencionales. Adicionalmente, la energía requerida en este proceso es mayor que en el caso convencional, la producción de este tipo de concretos requiere no solo de equipo especial de dosificación y mezclado, sino de procedimientos específicos de producción.

3. COMPORTAMIENTO DE LOS CUAD:

Las propiedades de los CUAD es el resultado de la alta densidad de este material. La micro-estructura de los CUAD difiere significativamente tanto de los concretos normales como de los de alto desempeño. Con respecto al comportamiento mecánico, los CUAD con micro-fibras muestran un comportamiento dúctil en compresión, el cual es función tanto del tipo como de la cantidad de fibras utilizado en la mezcla. En contraste con lo anterior, los CUAD sin fibra exhiben un comportamiento frágil.

3.1 Comportamiento en Compresión:

La resistencia a compresión típica de los CUAD está dentro del rango de los 150 MPa a los 250 MPa (Figura 3.1), sin embargo en aplicaciones especiales se han utilizado concretos con resistencias hasta 600 MPa. Hasta un 70-80% de la resistencia a la compresión los CUAD muestran un comportamiento elástico-lineal (figura 3.2). La falla del concreto con fibra es de naturaleza dúctil.

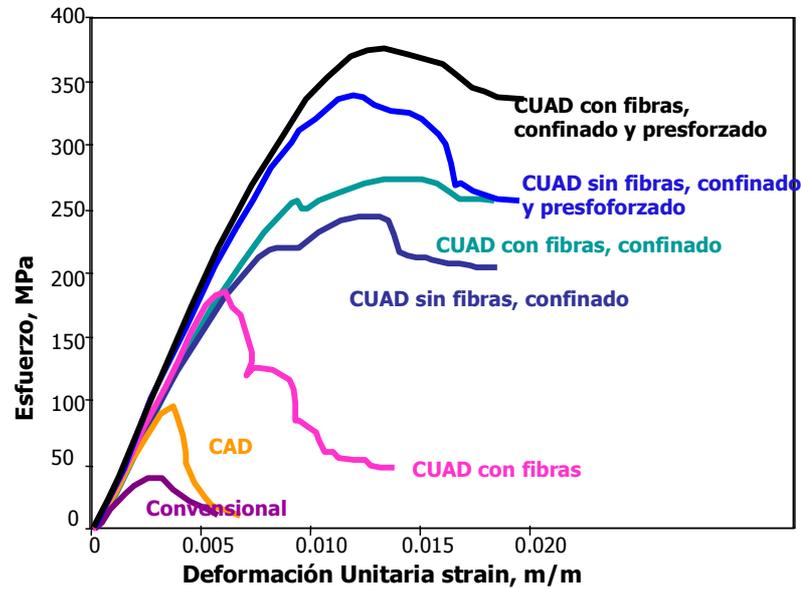


Figura 3.1 Resistencia a la Compresión de los CUAD

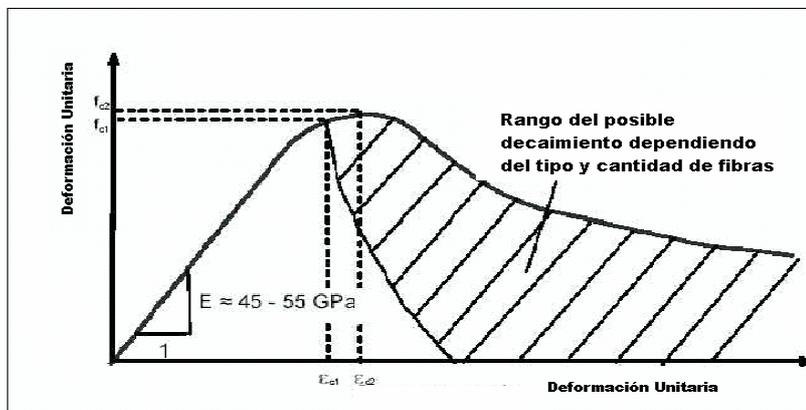


Figura 3.2 Influencia de la Fibra en el f'_c

Debido a la densidad de su estructura, el módulo de elasticidad de estos concretos es mayor que los concretos normales producidos utilizando el mismo tipo de agregados ($55 \text{ GPa} < E < 65 \text{ GPa}$). La razón de Poisson en el rango elástico, en general ha sido determinada alrededor de 0.2. Su deformación unitaria en el punto de esfuerzo máximo (valor Pico) es del orden de 4.4% (Figura 3.2). El rango descendente de la curva Esfuerzo-Deformación es prácticamente función de las micro-fibras, en particular depende de:

- . El contenido de fibras en la mezcla,
- . La geometría de las fibras (largo, diámetro),
- . Largo de la fibra en relación con el tamaño máximo del agregado,
- . Rigidez de las fibras,
- . Orientación de las fibras.

Las pruebas experimentales han dado como resultado que el valor máximo de la resistencia a la compresión no varía significativamente con el volumen de micro-fibras utilizado en la mezcla.

Los tratamientos con curado a vapor aceleran el desarrollo de la resistencia a compresión, el calor no solo acelera la reacción química sino que también mejora la mico-estructura. Es común en estos concretos utilizar el curado a vapor de 90°C durante 48 horas, permitiendo de esta manera obtener valores de resistencia a 48 horas comparables con los obtenidos a 28 días bajo curados convencionales.

3.2 Comportamiento en Tensión:

Debido a su comportamiento de naturaleza inherentemente frágil, la resistencia a tensión de los concretos convencionales es una propiedad que normalmente se desprecia. Los CUAD exhiben una resistencia a tensión significativa tanto antes como después del agrietamiento. Esta capacidad a tensión favorece el desarrollo de aplicaciones estructurales donde se requiera una alta capacidad para soportar cargas sin que se presente agrietamiento. Adicionalmente, la reducción o eliminación por completo de fisuras brinda una gran capacidad para soportar el ataque del ambiente, el cual utiliza las fisuras para ingresar rápidamente a la región interior del concreto.

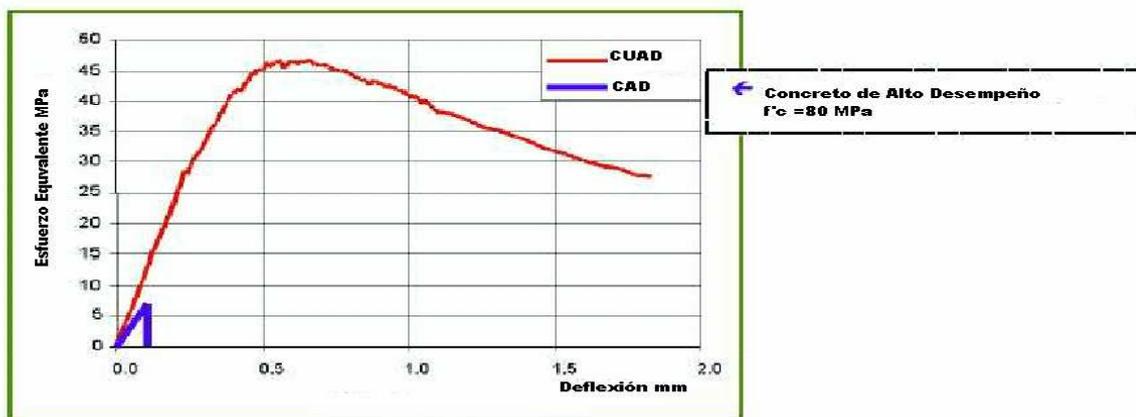


Figura 3.3 Esfuerzo a Flexión de los CUAD

Las pruebas de tracción directa de los CUAD con micro-fibras brindan valores máximos de resistencia a tensión dentro del rango de 8 MPa a 12 MPa. Adicionalmente las pruebas de flexión han brindado valores de hasta 55 MPa (Figura 3.3).

Dependiendo de la cantidad y la orientación de las fibras, la resistencia a tensión de los CUAD puede incrementarse más allá de la capacidad en tracción de la matriz cementicia. Adicionalmente, debido al efecto de las fibras, el comportamiento a tensión llega a ser del tipo dúctil. Posterior al agrietamiento de la matriz de concreto, el comportamiento de este material puede ser caracterizado por diagramas de “Esfuerzo-Ancho de Grieta” o “Carga – Desplazamiento” (Figura 3.4). Debe quedar claro que la pendiente descendente puede variar dependiendo tanto de la orientación como de la cantidad y el tipo de fibras.

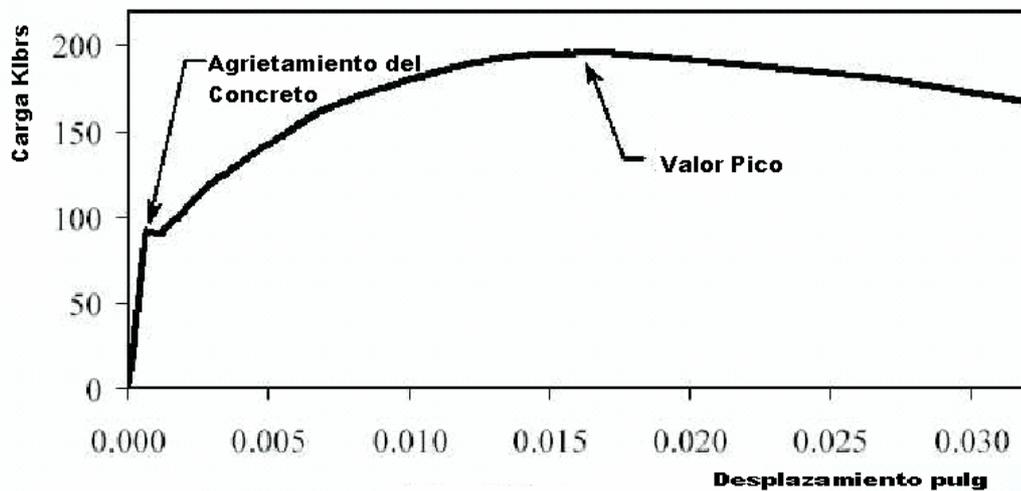


Figura 3.4 Diagrama Carga – Desplazamiento

Es importante tener en consideración la influencia que tiene la orientación de las fibras tanto en la resistencia a la tracción como en la ductilidad exhibida por el concreto. La dirección en que se realice el colado es un asunto de sumo cuidado pues este proceso afecta la orientación de las fibras fuertemente.

3.3 Comportamiento con el Tiempo:

3.3.1 Retracción:

La influencia de las fibras en la retracción autógena de los CUAD es prácticamente despreciable. En el caso de concretos curados bajo condiciones normales, el desarrollo de la retracción en este tipo de concretos es similar al exhibido por los Concretos de Alto Desempeño, sin embargo debido a la alta

densidad de los CUAD y la baja relación agua/cemento, la cantidad total de retracción es considerablemente menor.

Para el caso de los CUAD curados a vapor, la retracción posterior al ciclo de curado es muy reducida y prácticamente despreciable.

3.3.2 Flujo Plástico:

Hasta el día de hoy, la información experimental disponible es limitada, sin embargo, en general el Flujo Plástico en los CUAD ha mostrado ser menor que el presentado tanto por concretos convencionales como de alto desempeño. Como en el caso de los concretos normales, existe una fuerte dependencia entre la edad del concreto al momento de iniciar la carga y el coeficiente de Flujo Plástico.

En lo que corresponde al coeficiente de flujo plástico, este varía entre 0.13 y 0.50 para los primeros 100 días dependiendo del tipo de curado utilizado al inicio, obteniéndose menores valores para el curado con vapor sostenido y coeficientes bastante mayores para el curado al aire libre.

3.4 Resistencia al Fuego:

Debido a su alta densidad, los CUAD pueden experimentar alta presión de agua cuando estos son expuestos al fuego. Al igual que los concretos convencionales, esta presión puede generar deterioros en la estructura del concreto. Este problema se reduce con la utilización de fibras de polietileno. El uso de estas fibras genera un efecto de poros capilares los cuales minimizan la presión sobre el concreto. Experimentos han mostrado la eficiencia de este tipo de fibras. Otro aspecto a tener en cuenta en cuanto a la resistencia contra fuego, es la baja relación agua/cemento de los CUAD, el posible volumen de agua disponible que podría generar presión por evaporización del agua es mucho menor que en el caso de los concretos convencionales.

4.0 EJEMPLOS DE APLICACIONES DE LOS CUAD:

Los siguientes proyectos son algunos ejemplos representativos de aplicación de esta novedosa tecnología de los CUAD alrededor del mundo.

4.1 Pasarela Peatonal Sherbrooke:

La pasarela peatonal Sherbrooke, en Sherbrooke, Québec (Figura 4.1), constituye el primer ejemplo de aplicación de los CUAD en obras civiles. Esta estructura fue construida en 1997 Este paso salva una luz

libre de 60 metros. La estructura es una armadura espacial de sección abierta. El claro central está formado por seis elementos prefabricados de 10 metros de largo cada uno. Estos elementos son unidos en sitio mediante cables de postensión de alta resistencia y juntas de conexión.



Figura 4.1 Pasarela Peatonal Sherbrooke

La sección transversal es una losa de 30 milímetros de espesor con nervaduras espaciadas a cada 1.50 metros, la losa no cuenta con refuerzo alguno, el único refuerzo transversal colocado son cables monotorón no adheridos colocados en las nervaduras.

La estructura es longitudinalmente postensada por medio de cables colocados en el patín inferior y tensado en los extremos de la pasarela. Los elementos diagonales son miembros tubulares de acero inoxidable anclados en las nervaduras superior e inferior en forma articulada.

4.2 Puente Bourg-les-Valence:

Durante los años 2000-2001, el Gobierno Francés con la asesoría y asistencia del “Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA)” realizó el primer puente carretero con CUAD del mundo (Figura 4.2). Este fue construido por la empresa “Eiffage Construction” en el paso a Valence.

Este puente consta de dos claros simplemente apoyados de 20 metros de largo aproximadamente, los cuales se hacen continuos mediante una junta colada en sitio con CUAD.

El ancho total de la calzada es de 12 metros que incluyen dos aceras peatonales. La sección transversal la constituye cinco vigas prefabricadas en sección “ π ”, las cuales son hechas continuas mediante juntas longitudinales coladas en sitio con CUAD.



Figura 4.2 Puente Bourg-les-Valence

Las vigas principales son presforzadas mediante pretensión. No existe ningún tipo de preesfuerzo transversal, ni se colocó ningún tipo de acero pasivo de refuerzo transversal. En las zonas de conexión entre viga y viga se colocó acero de refuerzo pasivo para unir las vigas transversalmente.

4.3 Puente La Paz en Korea:

Entre los años 2001-2002, la empresa francesa Bouygues construyó sobre el río Han en Seúl, Korea del Sur el puente peatonal “La Paz”. Esta estructura cuenta con un claro central de 120 metros libres y 15 metros de altura, el cual es salvado a partir de una estructura en arco.

Este puente es desarrollado a partir de elementos prefabricados en sección “ π ”. La sección de las vigas cuenta con un peralte de 1.30 metros y una ancho en una sola pieza de 4.3 metros. Las vigas no cuentan

con ningún tipo de refuerzo pasivo transversal, la losa es nervada con un espesor de losa de 30 milímetros sin refuerzo.

El arco es ensamblado mediante seis piezas prefabricadas de 20 metros de largo, las cuales son soportadas en sitio mediante apoyos temporales. Los elementos son unidos mediante cables de postensión longitudinal colocada tanto en el patín inferior como superior.



Figura 4.3 Puente La Paz en Korea

4.4 Pasarela Peatonal Sakata Mirai:

Esta pasarela peatonal construida en Japón fue completada en el año 2002. Cubre un claro libre de 50 metros, La sección transversal es una viga tipo cajón de 2.4 metros de ancho y un peralte variable de 625 milímetros en los extremos a 1750 milímetros al centro. La sección cuenta con una serie de huecos circulares de diámetro variable en las paredes verticales.

El espesor de la losa superior utilizado en este caso fue de 50 milímetros, el espesor de las paredes verticales es de 75 milímetros. El puente se fabrico en seis tramos de diferente longitud y posteriormente se unió en el sitio por medio de cables de postensión de alta resistencia. En este caso las juntas entre las diferentes secciones son del tipo seca.



Figura 4.4 Puente Sakata Mirai

4.5 Cubierta Casetas de Peaje Viaducto de Millau:

Este proyecto fue finalizado a finales del 2004, y consiste en una elegante cubierta de techo tipo cajón con paredes sumamente delgadas.

Esta cubierta aparenta ser como dos hojas de papel, cuenta con un largo de 98 metros y un ancho de 28 metros y con un peso total alrededor de 2800 toneladas. Cuenta con un peralte variable con un valor máximo de 850 milímetros. Consiste de una serie de dovelas prefabricadas de 2 metros de ancho que posteriormente son unidas en sitio por medio de cables de postensión colocados en la dirección transversal.



Figura 4.5 Cubierta Casetas de Peaje Viaducto de Millau

5. CONCLUSIONES:

El uso de los CUAD es hoy en día una realidad que poco a poco esta ganando terreno en el campo del diseño y desarrollo de obras civiles. La gran cantidad de ejemplos desarrollados alrededor del mundo demuestran no solo la aceptación de este nuevo material por los profesionales involucrados en el desarrollo de grandes proyectos, sino que también verifica las cualidades y bondades de estos concretos.

Los CUAD tienen ventajas sobre los concretos convencionales y de alto desempeño, en cuanto a que requieren menores y más livianas secciones, adicionalmente brinda un alto potencial para eliminar o al menos reducir en porcentajes importantes las cantidades requeridas de acero pasivo por flexión, cortante y confinamiento.

La excepcional durabilidad de los CUAD, unida a su alta resistencia a la compresión y ductilidad, habilita y fomenta el desarrollo de soluciones novedosas a problemas difíciles de construcción como es el de soportar las cargas sísmicas a lo largo de la vida útil de la estructura.

Si bien es cierto, el uso de los CUAD promete grandes ventajas con respecto a lo ha sido las aplicaciones en concreto convencional. La implantación y el desarrollo de estos concretos obliga al establecimiento y métodos de control y aseguramiento de la calidad que implican costos adicionales y cuya omisión o su no seguimiento pueden generar grandes inconvenientes.

6. REFERENCIAS:

1. AFGC-SETRA Groupe de travail BFUP (2002) "Béton Fibrés a ultra-hautes performance
Recommandations provisoires "Documents Scientifiques et Techniques.
2. Vernet, C. Lukasik, J. and Prat, E., (1998) "Nanostructure, permeability and diffusivity of Ultra-
High Performance Concretes (UHPC)"International Symposium on High Performance and
Reactive Powder Concretes, Sherbrooke, Québec.
3. Roux, N., Andrade, C., and Sanjuan, M., (1996) "Experimental Study of Durability of Reactive
Powder Concretes" Journal of Materials in Civil Engineering, Feb. pp1-6.
4. Bonneau O., Lachemi M., Dallaire E., Dugat J., Aitcin P. (1997) "Mechanical Properties and
Durability of two Industrial Reactive Powder Concretes" ACI Material Journal, July-August, pp
286-290.
5. Balaguru P., Najm H.,(2004) "High-Performance Fiber-Reinforce Concrete Mixture Proportions
with Fiber Volume Fractions" ACI Materials Journal, July-August , pp. 281-286.
6. Balaguru P., Franklin H., (1999) "High Performance Use-Friendly Fiber Reinforced Composites
(HPFRCC3)", Proceedings of the Third RILEM Workshop. Mainz, Germany May 16-19, pp. 225-
238.
7. Fehling E., Leutbecher T., Bunje K., (2004) "Design Relevant Properties of Hardened Ultra High
Performance Concrete". International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel,
Germany, pp. 327-338.
8. Vernet, C. "UHPC Microstruture and Related Durability Performance Laboratory Assessment and
Field Experience Example". 3rd International Symposium on High Performance Concrete, PCI
National Bridges Conference. Orlando, USA.