



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO PARA
LA CONSTRUCCIÓN DE Puentes**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL:

GRADO DE ESPECIALISTA

EN:

ESPECIALISTA EN CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:

IRIERI GARDUÑO ALVAREZ



DIRECTOR DE TESINA: **ING. GREGORIO LUCIO PONCELIS GASCA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX A 8 DE ABRIL DEL 2024

Agradecimientos

Este trabajo de investigación no hubiese sido posible sin el apoyo de varias personas e instituciones a las que quiero mostrar mi agradecimiento.

En primer lugar, al Ing. Gregorio L. Poncelis por su labor como director del presente trabajo y por ser mi profesor de la materia “construcción de puentes”, por compartirme sus experiencias con mucha dedicación, su tiempo y su gran conocimiento, también por su comprensión y empatía sin las que el trabajo no hubiera sido posible.

Agradezco también a mi amada casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, mi querida facultad de Ingeniería que me enseñó a ser fuerte, valiente y una excelente profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías CONAHCYT por su apoyo económico, que posibilitó que me dedicara completamente a la elaboración de este trabajo.

Al departamento de la División de Ingeniería Civil y Geomática y en especial al Ing. Víctor Manuel Martínez quien fungió como Jefe del Departamento de Construcción, por su apoyo en todo momento.

A mis padres, mi hermano y a mis abuelitos maternos por su paciencia y apoyo incondicional durante este viaje académico.

A la Ing. María Elena Hernandez Gil por confiar en mi como ingeniera, enseñarme a no rendirme y recalcar me que las ingenieras somos valiosas e importantes.

A mi compañero de aventuras, Víctor Hugo, por apoyarme incondicionalmente y animarme todos los días.

A mi canino Jason por demostrarme ser un amigo fiel y acompañarme todas las noches al estudiar.

Finalmente, a mis mejores amigos Paulina e Israel por demostrarme su cariño y a todos aquellos que durante este tiempo han ayudado a que esta tesina sea hoy una realidad.

INDICE

1 Introducción

2 Objetivo General

2.1 Objetivos específicos

3 Hipótesis

4 Alcances

5 Planteamiento del problema

6 Justificación

7 Marco Teórico

7.1 Información Técnica del cemento

7.2 Propiedades del cemento portland

7.3 Elaboración del concreto convencional

8 Diseño de Mezclas del concreto

8.1 Métodos de dosificación basados en el contenido del cemento

8.2 Métodos de dosificación basados en la resistencia a compresión

8.3 Propiedades del concreto convencional

9 Clases de Concreto de Alto Desempeño

9.1 Concretos de Alta Resistencia Final

9.2 Concreto de Ultra Alto Desempeño

9.3 Caso de Aplicación: “Puente Superior Vehicular Entronque Monterrey-Cadereyta”

10 Conclusiones

11 Bibliografía

1. Introducción

“La historia de la construcción de puentes, es la historia de la civilización; por ella podemos medir gran parte del progreso humano” Franklin D. Roosevelt

La construcción de puentes ha sido una de las actividades más antiguas en la vida del hombre, colocándolos principalmente en obstáculos naturales, estos puentes estaban constituidos por materiales al alcance de la mano como piedra y madera.

El término “puente”, se utiliza para denominar las estructuras viales, que poseen un trazado por encima de la superficie y nos permiten cruzar con facilidad cuerpos de agua y barrancas. El arte de construir puentes tiene sus orígenes desde la prehistoria, en 1840 se tiene un avance eficaz en cuanto al desarrollo de la construcción de puentes ya que se desarrollaron nuevas vías de ferrocarril que contenían mayores exigencias de alineamiento y pendiente, lo que se tradujo a tener puentes más largos y altos, todo esto aunado a la revolución industrial donde se presentó una fuerte actividad económica que provocó el aumento del tráfico por carretera. En esta época se vio beneficiada la construcción de puentes por las mejoras en las pastas de mortero dando lugar a la invención del Cemento Pórtland.

Uno de los mejores constructores de puentes fue Beat Anton Ruttimann que nació en Suiza, en Pontresina el 21 de agosto de 1967, desarrollando una labor ingenieril muy grande: construir puentes, peatonales, en sitios rurales que carecen de comunicación con otros municipios donde, muchas veces, la presencia del Gobierno es escasa y no poseen difusión en medios de comunicación. En muchas de estas regiones del mundo las personas sufren la incomunicación y los desastres naturales ya que deben caminar kilómetros para llegar al otro lado de un río o, porque cuando aumentan el caudal, se hacen imposibles atravesarlos.

Entre 1987 hasta el 2017 construyó 760 puentes en 14 países, hechos de tuberías y cables de desecho y ha beneficiado a más de dos millones y medio de personas. Beat Anton Ruttimann, en una entrevista concedida a la revista suiza Schweitzer recordó tres puentes importantes en toda su trayectoria: uno es el puente más largo que ha hecho, con una luz de 264 metros sobre el río Aguarico en Ecuador, luego el puente internacional entre Honduras y El Salvador que conecta las comunidades de Mapulaca y Victoria, construido por pobladores que, años antes, habían estado en guerra. Finalmente, un puente montado dos veces en Myanmar porque la primera vez fue destruido por insurgentes del Kachin Independence Army durante una acción de guerrilla en 2011. Gracias a su trabajo y compromiso con la sociedad, decenas de empresas petroleras y europeas le apoyan con material de reciclaje. De esta manera ha logrado llegar a sitios apartados donde se convierten en obras de la ingeniería.

En México, el ferrocarril, que tenía la ruta desde la capital hacia el puerto de Veracruz fue el primer punto de partida de los puentes en la época Porfiriana. En el siglo XX el concreto armado y el presforzado (patentado por Eugene Freyssinet), impulsaron el desarrollo de las técnicas constructivas, ya que se trataba de construir losas planas de 10 m de claro como máximo, tiempo después se empezaron a construir losas sobre varias nervaduras de hasta 15 m de claro, para claros de mayor longitud se recurría al acero estructural, se observó que el concreto representaba menores costos que el acero porque de manera sencilla se fabricaba a pie de obra con elementos locales.

El Puente Baluarte, una obra de altas especificaciones con una longitud de 1,124 metros; es la estructura atirantada más grande a nivel mundial, pues cuenta con una altura a nivel de calzada de 402.57 metros, que permite librar una barranca, con un claro central de 520 metros. Se trata del puente más importante y emblemático que se haya hecho en la historia de nuestro país, de este tipo sólo es alcanzable con la tecnología más avanzada y con la conjunción de esfuerzos. La resistencia mínima del concreto para este proyecto fue de 400 kg/cm², la colocación del mismo se realizó por gravedad, con bomba y con grúa de construcción, al momento de estar vaciando el concreto, este se extendió con vibradores de inmersión, de combustión, eléctricos y neumáticos.

Tabla 1 Características Principales " Puente Baluarte" Fuente: Asociación Mexicana de Vías Terrestres AMIVTAC

DESCRIPCION	CANTIDAD
Longitud total	1,124 m.
Profundidad de la barranca	402.57 m.
Número de apoyos	12
Número de claros	11
Claro principal	520 m.
Ancho total	22 m.
Longitud de estructura de acero	432 m.
Longitud de estructura de concreto	692 m.
Altura máxima de pila – pilón (apoyo no. 6)	101 m.
Altura máxima de pilas (apoyo no. 9)	153 m.
Dimensión máxima de zapatas	18 X 30 m.
Tipo de atirantamiento	Abanico
Número de tirantes	152
Longitud máxima de tirantes	280 m.
Número de torones por tirante	20 A 47 pza.
Pendiente longitudinal	5 %

Como bien se sabe en México se posee cerca de dos millones de kilómetros cuadrados de superficie terrestre y dentro de ellos se cuenta con 50 ríos principales, numerosos tributarios, riachuelos y arroyos permanentes o intermitentes, además de los ecosistemas lénticos (humedales, lagos y lagunas) (Aguilar 2003, Torres Orozco 2011), lo cual ha propiciado que nuestro país tenga mejoras, creando nuevos proyectos de puentes con diseños optimizados conectando distancias considerables que antes solo podían ser cruzadas con botes o lanchas.

Las carreteras y puentes construidos hasta el día de hoy en nuestro país, han sido parte de obtener una infraestructura que comunique y beneficie económicamente, ya que las vías de comunicación son trascendentales para alcanzar la intermovilidad e interconectividad, nos permite el movimiento de mercancías, productos e insumos y lo más importante que comunica varias zonas del país.

La Secretaria de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) fue pionera en instalar laboratorios para controlar la calidad de los materiales de la construcción e implementar las normas necesarias para ello, el desarrollo de estas ciencias aplicadas permitió lograr concretos de mayor resistencia y confiabilidad, lo que propicio que se pudieran construir puentes de grandes dimensiones, un ejemplo claro es el arco del puente Belisario Domínguez, que vino a reemplazar

el puente colgante sobre el río Grijalva, en Chiapas, en 1954. El concreto reforzado se generalizó para su aplicación en puentes comunes con claros pequeños y modernos.

La idea del concreto presforzado es muy antigua, se tuvo que desarrollar concretos y aceros de alta resistencia para que se permitiera la aplicación de grandes fuerzas externas y se disminuyeran las deformaciones diferidas, el primer puente en el continente americano con este tipo de concreto fue el puente Zaragoza construido en 1953 sobre el río Santa Catarina en la ciudad de Monterrey, pocos años después se construyó el puente sobre el río Tuxpan donde se le aplicaron dovelas en doble voladizo, teniendo claros de 92 m con articulaciones metálicas al centro de los claros, las deficiencias se vieron notables en la poca experiencia para este tipo de construcción. El incremento de la industria del presfuerzo y de la prefabricación hizo que se requiriera diseños de mezclas que elevaran la resistencia y durabilidad ante deficiencias en el concreto y en los tiempos de construcción.

Por lo anterior, es necesario realizar una investigación que nos lleve de la mano a criterios de diseño óptimo de mezclas de concreto de alto desempeño que fortalezcan los procesos de diseño y de construcción, considerando efectos de los agentes naturales, con la meta de ofrecer seguridad a los usuarios.

2. Objetivo General

Identificar los materiales adecuados, así como, las dosificaciones que conducen a los mejores resultados de mezclas de concretos de ultra alto desempeño aplicable a proyectos de puentes ayudando a disminuir el tiempo en el que se producen distintos efectos que dañan la resistencia de la estructura mejorando sus procesos constructivos.

❖ 2.1 Objetivos específicos

- Conocer los diseños de mezclas de concreto de altas resistencias comparadas con diseños de mezclas de concretos convencionales.
- Resaltar la importancia de incluir diseños optimizados a proyectos actuales.

3. Hipótesis

Mediante la mejora en el Diseño de las proporciones de la mezcla de concreto (agregados, arenas, aditivos), es posible producir concretos de Ultra Alto Desempeño con resistencias mínimas de 400 kg/cm² y con una larga vida útil, que beneficie la construcción de puentes que están sometidos a desgastes naturales.

4. Alcance

Nos encontramos actualmente en un mundo donde la ingeniería debe ser de estándares altos e innovadores, donde se requiere infraestructura segura y eficiente que nos permita tener un país con mejores comunicaciones, generando así, una elevación en la economía. A través del análisis de procesos constructivos de puentes en México se podrá lograr una fuente de información que nos permita reconocer los logros y errores de tales metodologías con la finalidad de reforzar los aciertos y evitar las malas decisiones que se hayan cometido a lo largo de la historia. Al día de hoy se cuenta con tecnología aplicada a los materiales que ha engrandecido las cualidades de los agregados, aditivos, arenas, cemento y maquinaria especializada.

Reconocer los problemas en la construcción de puentes en cuanto al diseño de los mismos, nos permitirá utilizar concretos de alto desempeño adecuados para el fortalecimiento, de pilas y cimentaciones que sufren los efectos de la naturaleza o inestabilidad de los suelos.

5. Planteamiento del Problema

En 1926 el Estado inició la construcción de carreteras en México. Los ingenieros responsables crearon una primera colección de proyectos para resolver problemas de paso vehicular sobre ríos y vialidades. Esa colección se usó en casi todos los puentes de antiguas carreteras como la México-Laredo, la México-Acapulco, o la México-Morelia-Guadalajara, utilizando resistencias de concreto de 200 a 250 kg/cm²

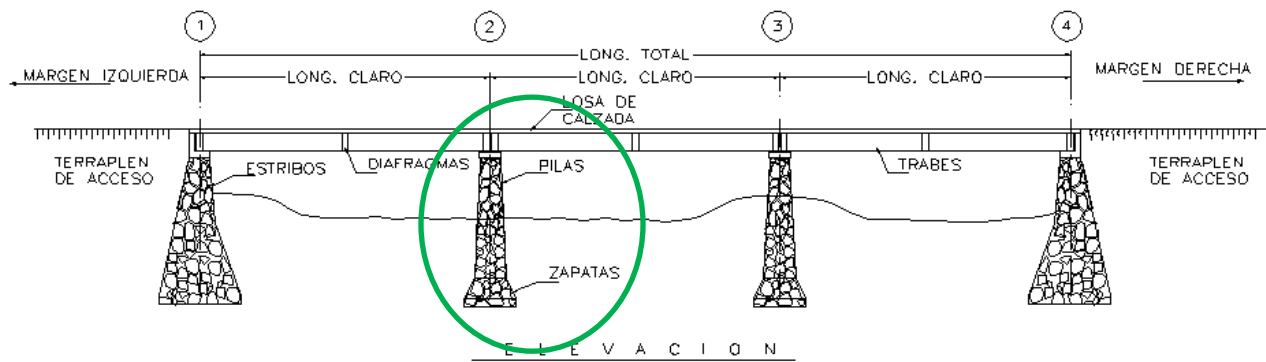


Figura 1 Esquema básico de partes de un puente

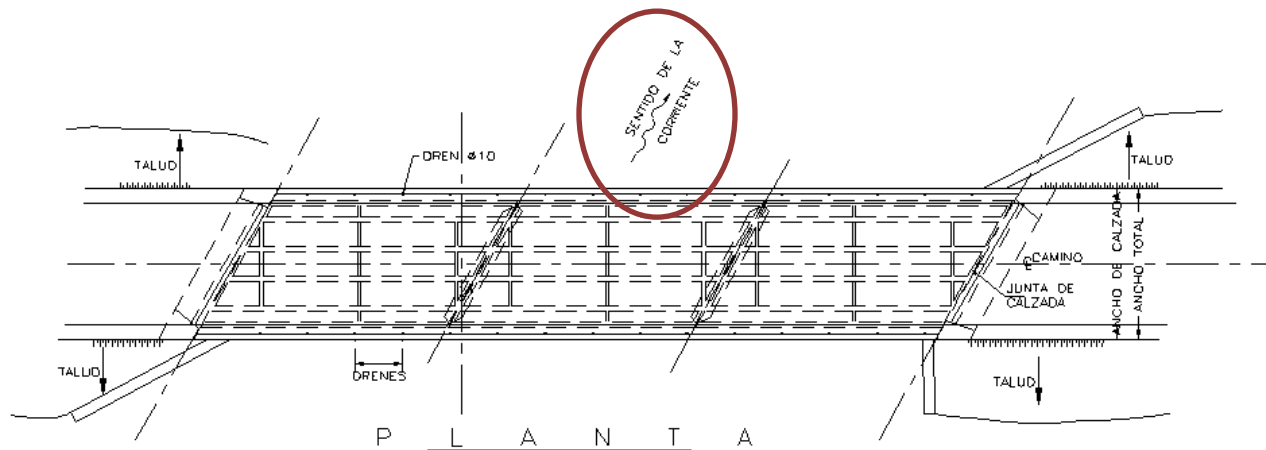


Figura 2 Vista en Planta de un Puente

En nuestro país contamos con 15 corredores carreteros, ellos están clasificados por la SICT como transversales y longitudinales, los corredores longitudinales se encuentran ubicados en las costas del Golfo de México y del Océano Pacífico que son zonas de gran presencia de cuerpos de agua es por ello que en estas zonas del país es donde hay más puentes existentes.



Figura 3. Corredores carreteros de México (Fuente: INEGI)

Ha sido frecuente la presencia de sucesos naturales como lluvias fuertes y huracanes, factor al que se suma el calentamiento global y movimientos sísmicos, huracanes como Wilma (2005), Manuel (2013) y Patricia (2015) solo por mencionar algunos han provocado que aumente el tránsito de avenidas, aunado a la inestabilidad de taludes generando la mayor falla en los puentes que es el efecto de socavación e inestabilidad en la estructura viéndose expuestas las pilas de los pilotes de cimentación.

Estos problemas que se tienen se centran en los estudios preliminares, una de los problemas principales es *la falla en las mezclas de concreto* que han utilizado estos proyectos, ya que presentan una mala dosificación de los materiales, una mano de obra poco capacitada y una mala supervisión del encargado técnico de la obra. Las medidas de protección contra estas fallas son: la necesidad de tener mezclas de concreto de alto desempeño para lograr diseños en puentes que garanticen la durabilidad, que puedan asumir los desafíos hidráulicos y topográficos de la zona pudiendo controlar y retrasar los problemas de estabilidad.

La calidad de los agregados tanto gruesos como finos es de gran importancia. Debido a que, por lo menos tres cuartas partes del volumen del concreto está constituido por agregado. Los agregados no sólo pueden limitar la resistencia del concreto, puesto que agregados débiles no pueden constituir un concreto resistente, sino que además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2017).

6. Justificación

La problemática anteriormente analizada nos conduce a tener la necesidad de establecer diseños eficientes en las mezclas de concreto, por múltiples factores ya sea por efectos naturales o por efectos de la poca durabilidad en los materiales de construcción, es necesario cambiar los diseños y dosificaciones en las mezclas de concreto, utilizando concretos de alto desempeño que incrementen sus resistencias.

En el estado de Michoacán existe el puente “Dr. Ignacio Chávez” que está ubicado en el municipio Lázaro Cárdenas, que hace posible la comunicación de los municipios sobre el Río Balsas. La SICT realizó un proyecto denominado “*El Puente Paralelo al Puente Dr. Ignacio Chávez de la carretera Lázaro Cárdenas – Puente Dr. Ignacio Chávez en el Estado de Michoacán*” este proyecto quedó en etapa de estudios de factibilidad e impacto ambiental, surgió la idea de colocar un puente paralelo al puente “Dr. Ignacio Chávez” que actualmente conecta con la carretera de cuota Nueva Italia – Lázaro Cárdenas, debido a que se tuvo un crecimiento e industrialización de la Ciudad Lázaro Cárdenas se presentó la necesidad de mejorar la infraestructura carretera, por lo que se sometió a consideración de las autoridades.



Figura 4 Esquema de ubicación del Puente paralelo al Puente Dr. Ignacio Chávez

Sus características particulares del proyecto comprendían una longitud de 0.62 km de la superestructura y sería una estructura compuesta de una subestructura de estribos y *concreto ciclópeo de $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$* , este tipo de concreto se realiza añadiendo rocas de tamaño grande, a medida que se va colocando el concreto se economiza material, ya que se van llenando los huecos que quedan hasta homogenizar el conjunto, es un sistema que ha quedado en desuso, debido a su poca resistencia, exceptuando construcciones auxiliares como terrenos con suelos muy resistentes, pero para estas condiciones de proyecto el uso de este concreto es muy riesgoso

debido a que la ubicación del puente paralelo es sobre el río Balsas y sobre una zona de industrialización alta con empresas de transportes logísticos alrededor que poseen camiones con grandes contenedores.

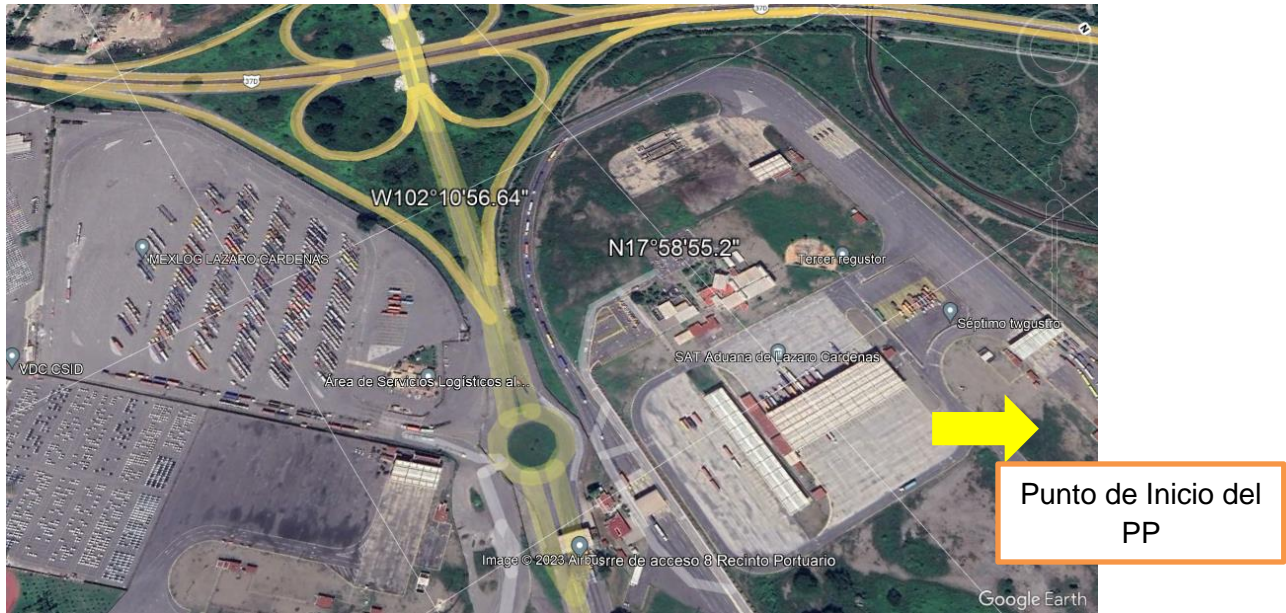





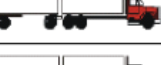

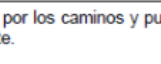
Figura 5 Vista Geográfica del lado izquierdo del Punto de Inicio del Puente Paralelo al Puente Dr. Ignacio Chávez (Estado de Michoacán- 2022)



Figura 6 Vista Geográfica del lado derecho del Punto de Inicio del Puente Paralelo al Puente Dr. Ignacio Chávez (Estado de Michoacán- 2022) L






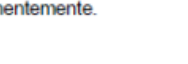
La NOM-012-SCT-2-2017 “Pesos y dimensiones sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal”, establece los tipos de características de cada uno de ellos:

Tabla 2 , Tabla 5.2.2 de la NOM-012-SCT-2-2017 sobre característica de camiones y camiones de remolque

CAMIÓN UNITARIO (C)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8-10	
CAMIÓN-REMOLQUE (C-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Nota: Los camiones unitarios y camión remolque deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

Tabla 3 Tabla 5.2.3 de la NOM-012-SCT-2-2017 sobre característica de tracto-camión articulado

TRACTOCAMION ARTICULADO (T-S)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Nota: Las configuraciones de tractocamión articulado deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

Tabla 4, Tabla 5.2.3 de la NOM-012-SCT-2-2017 sobre característica de tracto-camión semirremolque -remolque

TRACTOCAMIÓN SEMIRREMOLQUE-REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Nota: Las configuraciones de tractocamión semirremolque-remolque y tractocamión semirremolque-semirremolque deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

Cada uno de estos tipos de camiones y tracto-camiones con sus respectivos remolques tienen un peso mayor y un elevado tránsito, a diferencia de un vehículo particular que transitaría en una carretera de jurisdicción federal que no se encuentra en una zona de alta industrialización, el proyecto se justifica en la necesidad de mejorar la infraestructura para que pueda ser más eficiente el flujo de este tipo de vehículos con pesos mayores, es por ello que las especificaciones de concreto que menciona este proyecto para subestructura es de atención, sin olvidar que se encuentra en una zona de alta humedad para la estructura.

Se pretendió utilizar para toda la estructura un concreto hidráulico de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ para losas nervadas, remate de parapetos y base de pilastras, coronas y muros de respaldo para los estribos 1 y 2, tapetes y bancos, posteriormente un concreto hidráulico de $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ para banquetas, guarnición y lavaderos y finalmente un concreto hidráulico de $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ para postes de defensas.

El concreto hidráulico, como bien sabemos es una combinación de cemento Pórtland, agregados pétreos, agua y en ocasiones aditivos, para formar una mezcla moldeable que al fraguar forma un elemento rígido y resistente, sin embargo, para este tipo de proyectos sigue representando una resistencia muy baja que pueda ser favorable para estas condiciones anteriormente mencionadas.

Es por ello que, al mencionar este proyecto de mejora, se tiene como objetivo impulsar la importancia de utilizar concretos de resistencias y cualidades más elevadas, en zonas que cuentan con una topografía donde el suelo se presenta poco estable, proponiendo un diseño de mezcla de concretos de alta resistencia que puedan salvaguardar la vida de las personas que ocupan las vías de comunicación y hacer frente a los posibles deterioros de la estructura por diversas causas.

7. Marco Teórico

En la ciencia del concreto se concibe como un material de alta complejidad para el que la teoría no ha alcanzado un nivel en el que se generen formulas con base a la experimentación adecuada, por otro lado, el número de variables que afectan de manera significativa es muy grande y algunas de estas variables son inevitables, que las matemáticas exactas dan pie en muchos casos a estadísticas aproximadas.

Las fortalezas del material de construcción “*El Concreto*”, son la resistencia a la compresión y la accesibilidad que se tiene para fabricar elementos de diferente geometría. Se han desarrollado diversos trabajos para mejorar la resistencia a la compresión, sin embargo, para algunas aplicaciones el mejoramiento logrado ha resultado insuficiente, ya que nos enfrentamos a un material rígido que por su resistencia al diseño necesita elementos estructurales más voluminosos y pesados. Para hacer frente a esta deficiencia y así poder usar concretos con características eficientes para estructuras de puentes que han sido exclusivas del acero especialmente o de concretos de mediana resistencia.

7.1 Información Técnica del Cemento:

- ❖ *Norma de Calidad NMX-C-144-ONNCCE-1999-2015 “Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Requisitos para el Aparato Usado en la Determinación de la Fluidez de Morteros”*
- Cemento Portland Ordinario: es excelente para construcciones en general, zapatas, columnas, trabes, castillos, dalas, muros, losas, pisos, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales (bancas, mesas, fuentes, escaleras, etc.). Ideal para la elaboración de productos prefabricados (tabicones, adoquines, bloques, postes de luz, etc.)
- Cemento Portland Compuesto: Presenta excelente durabilidad en prefabricados para alcantarillados, a los concretos les proporciona una mayor resistencia química y menor desprendimiento de calor, es compatible con todos los materiales de la construcción convencionales, como arenas, gravas, piedras, mármol, etc.; así como, con los pigmentos (resistentes a la reacción solar) y aditivos, siempre que se usen con los cuidados y dosificaciones que recomiendan sus fabricantes.
- Cemento Portland Puzolánico: Ideal para la construcción de zapatas, pisos, columnas, castillos, dalas, muros, losas, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales bancas, mesas, fuentes, escaleras, etc.). Especialmente diseñado para la construcción sobre suelos salinos (obras expuestas a ambiente químicamente

agresivo). Alta durabilidad en prefabricados para alcantarillados como: brocales para pozos de visita, coladeras pluviales, registros y tuberías para drenaje.

- Cemento Portland Ordinario Blanco: Excelente para obras ornamentales o arquitectónicas como fachadas, monumentos, lapidas, barandales, escaleras, etc. Gran rendimiento en la producción de mosaicos, terrazas, monumentos, lavaderos, W.C., tirolés, pega azulejos, junte adoradores, etc. Este cemento puede pigmentarse con la calidad para obtener el color deseado, se puede mezclar con los materiales de a construcción convencionales, siempre y cuando estén libres de impurezas.
- Cemento Portland Ordinario Resistente a los Sulfatos: Proporciona mayor resistencia química para concretos en contacto con aguas o suelos agresivos (aguas marinas, suelos con alto rendimiento de sulfatos y sales), recomendables para la construcción de presas, drenajes municipales, y todo tipo de obras subterráneas.

Tabla 5 Composición típica del cemento portland ordinario

Nombre Químico	Formula Química	Notación Corta	% en peso	Función mineral
Silicato Tricálcico	3CaO·SiO ₂	C ₃ S	50	Se hidrata rápidamente y confiere resistencias altas y fraguado
Silicato Dicálcico	2CaO·SiO ₂	C ₂ S	25	Se hidrata lentamente e imparte resistencia a largo plazo.
Aluminato Tricálcico	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A	12	Se hidrata casi instantáneamente y muy exotérmicamente. Contribuye al fraguado y a la resistencia temprana
Ferroaluminato Tetracálcico	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8	Se hidrata rápido. Actúa como fundente en la manufactura de Clinker. Da la apariencia grisácea al cemento
Sulfato cálcico hidratado (yeso)	CaSO ₄ ·2H ₂ O	C ₅ H ₂	3.5	Se muele con el Clinker para controlar la reacción del C ₃ A

- ❖ *Norma de Calidad NMX-C-021-ONNCCE-1999-2015 "Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Requisitos para el Aparato Usado en la Determinación de la Fluidez de Morteros"*

Diseño especialmente para trabajos de albañilería, junteo o pegado de bloques, tabiques, ladrillos, piedra y mampostería; aplanado, entornado y repellido, resanes; firmes, plantillas y banquetas. No debe utilizarse en la construcción de elementos estructurales.

Tabla 6 Tipos de Cemento (Norma NMX-C 414 ONNCCE)

Tipo	Denominación
CPO	Cem. Portland Ordinario
CPP	Cem. Portland Puzolanico
CPEG	Cem. Portland c/Escoria Granulada
CPC	Cem. Portland Compuesto
CPS	Cem. Portland c/humo de Sílice
CEG	Cem. c/Escoria Granulada

Tabla 7 Cementos con características especiales (Norma NMX-C 414 ONNCCE)

Nomenclatura	Características especiales de los cementos
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alkali-agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

Tabla 8 Especificaciones mecánicas (Norma NMX-C 414 ONNCCE)

Clase Resistente	Resistencia a la compresión (N/mm ²)		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

7.2 Propiedades del cemento Portland

La mayor parte de las especificaciones conocidas para este cemento, limitan su composición química y sus propiedades físicas. En las normas ASTM C150 y ASTM C595 encontramos las especificaciones para el cemento Portland tipo I, II, III, IV y V, y las características para los cementos adicionados hidráulicos, el tipo IS cemento Portland de escoria de alto horno, tipo IP cemento puzolánico Portland, tipo P cemento Portland puzolánico para su uso cuando no se requieren mayores resistencias a edades tempranas, tipo I (PM) puzolana.

Los materiales puzolánicos o adiciones activas de mayor interés en la industria del cemento pueden dividirse en dos grandes grupos: naturales (Calcinados o no) y artificiales (subproductos industriales). Al primer grupo pertenecen las verdaderas puzolanas y las tobas volcánicas, así como una serie de otros productos naturales, que tienen en común un comportamiento similar frente a la cal. En el segundo grupo, están, principalmente, las escorias de horno alto, las cenizas volantes y las arcillas calcinadas.

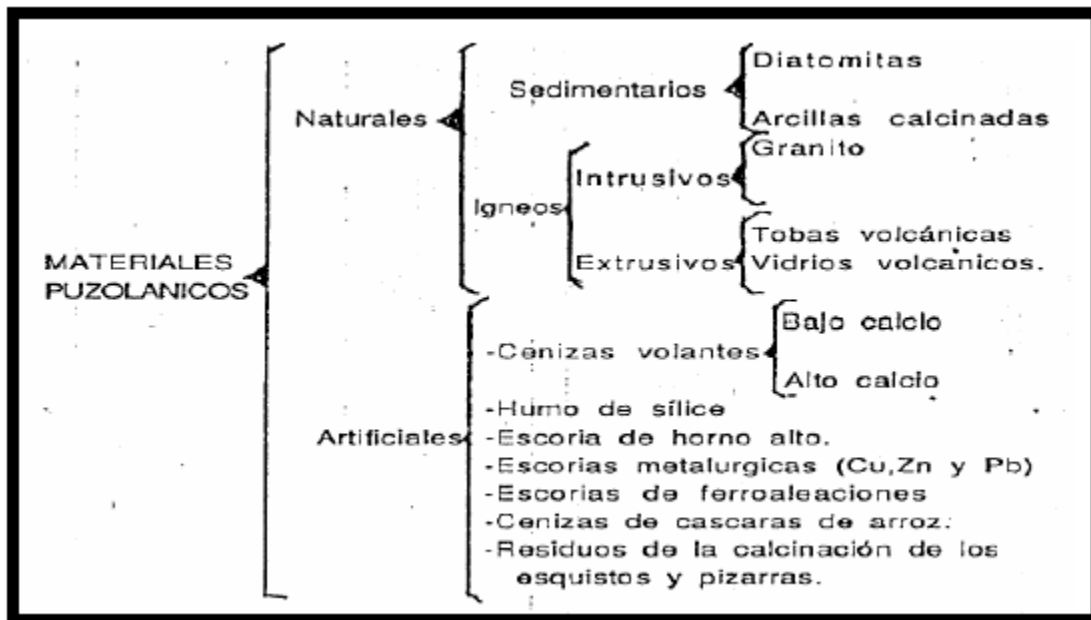
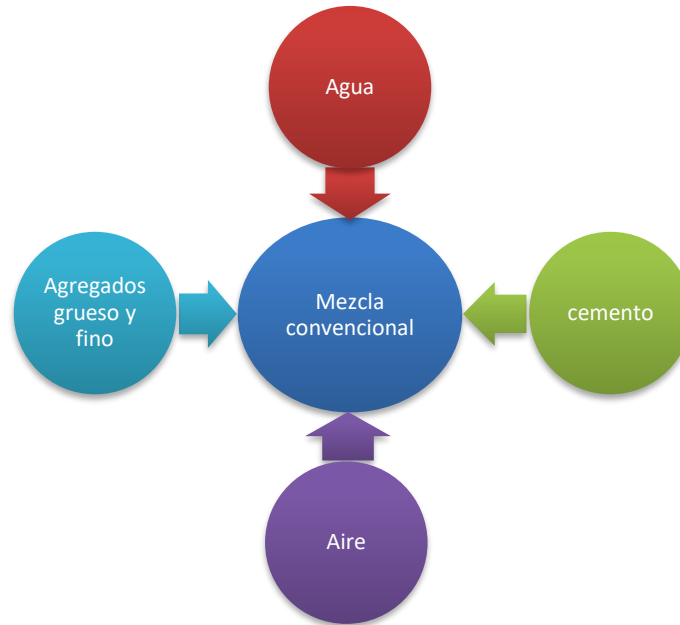


Figura 7 Clasificación de materiales puzolánicos. Fuente: ("Lección 10.- Cementos / Materiales De Adición," 2015).

7.3 Elaboración del concreto convencional



Esquema 1 Elaboración del concreto

Cemento: es una mezcla conglomerante elaborada a partir de la hidratación en agua de caliza y arcilla molidas, a las que se añade gravas y arenas para adquirir mayor resistencia. Se mezclan los componentes secos y, luego de su hidratación, ha de aplicarse rápidamente, pues su secado es en corto tiempo. Como resultado se obtiene una pasta flexible y plástica, muy uniforme (si los componentes secos han sido bien molidos) que al secar o fraguar adquiere una dureza y una resistencia únicas. También se trata de una pieza flexible, soportando bien las fluctuaciones y movimientos de la tierra.

Agregados: Son componentes derivados de la trituración natural o artificial de diversas piedras, y pueden tener tamaños que van desde partículas casi invisibles hasta pedazos de piedra. Junto con el agua y el cemento, conforman el trío de ingredientes necesarios para la fabricación de concreto. Los agregados pueden ser de piedra triturada, grava, arena, etc. Mayormente compuesta de partículas individuales.



Figura 8 Agregados finos y gruesos (Fuente: Electrónica)

- ✓ **Agregados finos:** consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10mm.
- ✓ **Agregados gruesos:** son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm. Los agregados conforman el esqueleto granular del concreto y son el elemento mayoritario ya que representan el 80-90% del peso total de concreto, por lo que son responsables de gran parte de las características del mismo.
- ✓ **Agua:** es el componente que se utiliza para generar las reacciones químicas en los cementantes. Se utiliza agua potable, es decir, aquella que por sus características químicas y físicas es apta para consumo humano o cumpla con los requisitos de calidad establecidos en la *NORMA N-CTM-2-02-003/02 "Características de los Materiales"*.

Tabla 9 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas en el agua

Impurezas	Valores en partes por millón (ppm)	
	Tipo de cemento	
	Cementos ricos en calcio	Cementos resistente a los sulfatos (RS)
Sólidos en suspensión en aguas naturales (limos y arcillas), máximo	2 000	2 000
Sólidos en suspensión en aguas recicladas ^[1] : (finos de cemento y de agregados), máximo	50 000	35 000
Cloruros como Cl ^[2] :		
• Para concreto con acero de presfuerzo y piezas de puentes ^[3] , máximo	400	600
• Para concretos reforzados que estén en ambiente húmedo o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares ^[3] , máximo	700	1 000
Sulfato como SO ₄ ^[2] , máximo	3 000	3 500
Magnesio como Mg ⁺⁺ ^[2] , máximo	100	150
Carbonatos como CO ₃ ⁼ , máximo	600	600
Bióxido de carbono disuelto como CO ₂ , máx	5	3
Álcalis totales como Na ⁺ , máximo	300	450
Total de impurezas en solución, máximo	3 500	4 000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido) ^[4] , máximo	150	150
Potencial de hidrógeno (pH), mínimo	6	6,5

[1] Se considera como agua reciclada, la que se usó en el lavado de unidades revoledoras de concreto, que después de un proceso incompleto de sedimentación se emplea en la fabricación del concreto hidráulico y que contiene en suspensión un alto porcentaje de finos del cemento y de los agregados, sales solubles del cemento y aditivos.

[2] El agua que exceda los límites listados para cloruros, sulfatos y magnesio, podrá emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados, no excede dichos límites.

[3] Cuando se utilice cloruro de calcio (CaCl₂) como aditivo acelerante, se tomará en cuenta la cantidad de éste para no exceder el límite de cloruros indicado en esta Tabla.

[4] El agua que no cumpla con el contenido máximo indicado se podrá usar siempre y cuando el agregado fino que se emplee en el concreto, probada conforme al procedimiento indicado en el Manual M-MMP-2-02-026, *Impurezas Orgánicas en Agregados Finos*, no produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3.

- *Materiales no convencionales en la elaboración del concreto convencional*

Aditivos: Pueden ser minerales o químicos que ofrecen propiedades de manera más efectiva como reducir el contenido de agua, o mejorar la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado y curado en condiciones de clima adverso.

Se adicionan en pequeña proporción al concreto durante el mezclado en porcentajes entre 0.1% y 5% (según el producto o el efecto deseado) de la masa o peso del cemento, con el propósito de producir una modificación en algunas de sus propiedades originales o en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en condiciones de trabajo en una forma susceptible de ser prevista y controlada. Esta definición excluye, por ejemplo, a las fibras metálicas, las puzolanas y otros.

Actualmente los aditivos permiten la producción de concretos con características diferentes a los tradicionales, teniendo un creciente impulso a la construcción y se consideran como un nuevo ingrediente, conjuntamente con el cemento, el agua y los agregados. Existen ciertas condiciones o tipos de obras que los hacen indispensables.

La Norma ASTM C 125 definen al aditivo como: “Un material distinto del agua, de los agregados y cemento hidráulico que se usa como componente del concreto o mortero. Las dosis en las que se utilizan los aditivos están en relación a un pequeño porcentaje del peso de cemento, con las excepciones en las cuales se prefiere dosificar el aditivo en una proporción respecto al agua de amasado” (Ingenieros Civiles, 2009).

Su uso está condicionado por tres razones:

- a. El resultado no debe variar sustancialmente la dosificación básica.
- b. El aditivo no debe de generar efectos negativos en otras propiedades del concreto.
- c. El análisis de costo debe de tener su debida justificación.

8. Diseño de Mezclas de concreto

El siglo XX marca una nueva etapa en el conocimiento científico y técnico del concreto. Fue precisamente el ingeniero francés Rene Feret quien probablemente realizo el primer estudio racional sobre diseño de mezclas de concreto entre los años 1892-1897, a Feret le siguieron Abrams, Fuller, Weymouth, Thaulow, Walker, Goldbek, Gray, Talbot, etc. quienes cimentaron las bases para la moderna tecnología del concreto (Figueredo & Padilla, 2017).

El estudio de los métodos de dosificación más significativos es un primer paso de cara a dominar el diseño de mezclas de concreto. En este sentido, el análisis en detalle de las metodologías más representativas proporciona unas nociones esenciales en el arte de dosificar, por lo que a continuación se describen cinco procedimientos básicos. Más tarde, se comentan otros métodos mundialmente utilizados con el fin de dar una visión lo más amplia posible sobre el tema de la dosificación.

Las metodologías de dosificación pueden dividirse, fundamentalmente, en dos grupos: uno formado por los métodos que tienen como dato principal de partida la dosificación de cemento y otro formado por los concretos definidos por sus resistencias mecánicas, especialmente la de

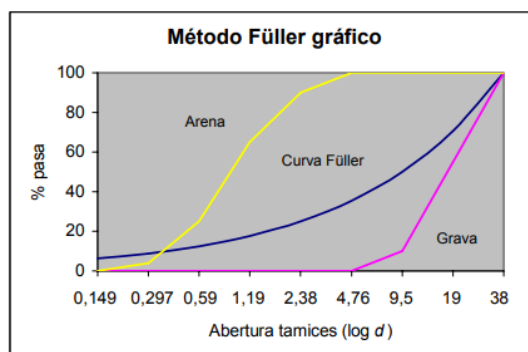
compresión. En ambos casos, sin embargo, se deben aportar otros datos como pueden ser la consistencia, tamaño máximo del agregado a emplear, tipos de agregados, etc.

Existen varios procedimientos para determinar la mezcla óptima cuando se conoce la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, no obstante, se destacan tres de ellos, que son el método de Füller, el de Bolomey y el de Faury. En el caso que conozcamos la resistencia del concreto que vamos a fabricar nos centraremos, en el del American Concrete Institute (ACI) y en el De La Peña.

8.1 Métodos de dosificación basados en el contenido del cemento

Método de Füller

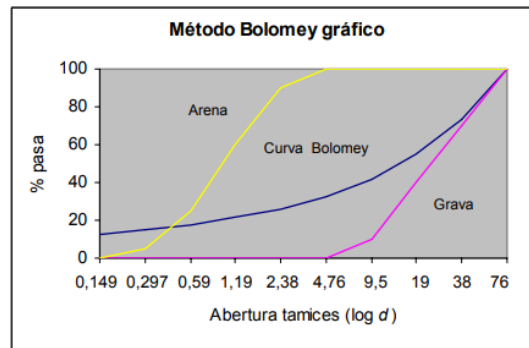
Creado en el año 1907 en los EUA, el método de dosificación de Füller es uno de los más clásicos y fáciles de aplicar cuando conocemos la cantidad de cemento que deberá tener el concreto; su uso está muy indicado en obras de concreto armado (pero donde no existan secciones fuertemente armadas), en las que el tamaño máximo del agregado esté comprendido entre 50 ± 20 mm, la forma de los agregados sea redondeada y la cantidad de cemento por metro cúbico no sea inferior a 300 kg



Gráfica 1 Método Fuller (Diseño de Hormigones Dirigido a la Aplicación, Capítulo 2 Estado del Conocimiento, García Perez J.2004)

Método Bolomey

En el año 1925, Bolomey propuso una curva granulométrica continua de agregado más cemento, muy similar a la propuesta por Fuller, - Thompson. La curva de Bolomey tiene su aplicación más importante en la dosificación de concretos masivos (es decir para grandes macizos como en presas, muros de gravedad, vertederos, etc.) (Figueredo & Padilla, 2017).



Gráfica 2 Método Bolomey (Diseño de Hormigones Dirigido a la Aplicación, Capítulo 2 Estado del Conocimiento, García Perez J.2004)

Método de Faury

Fue propuesto en el año 1942, como consecuencia de un estudio general del concreto realizado por Caquot. Faury propone una nueva ley granulométrica de tipo continuo que depende de la raíz quinta del tamaño del agregado ($5\sqrt[5]{d}$). Su campo de aplicación más importante es en concretos densamente armados y en estructuras prefabricadas.

8.2 Métodos de dosificación basados en la resistencia a compresión

Método American Concrete Institute (ACI)

Este método es el resultado de extensas investigaciones, en el campo del concreto, de varias organizaciones norteamericanas entre ellas: el A.C.I. American Concrete Institute (ACI), - Portland Cement Association (P.C.A.). Se fundamenta en los trabajos experimentales de Andrew Duff Abrams, Richart y Talbot, Goldbeck y Gray. Es un método empírico cuyos resultados han sido confirmados por una amplia información experimental.

El procedimiento de diseño se puede realizar ya sea mezclando los materiales por volumen absoluto y luego calculando los pesos de cada uno de los componentes, o, directamente, calculando el peso del concreto y deduciendo luego el peso de cada uno de los ingredientes, siempre para obtener un metro cúbico de concreto. Ambas formas de cálculo de la mezcla tienen en cuenta todo lo relacionado con la facilidad de colocación, resistencia a la compresión o a la flexión, durabilidad y economía; además tiene una gran ventaja; se puede programar con facilidad para un rápido y práctico manejo del método (Figueredo & Padilla, 2017).

Método De La Peña

Este método de dosificación, publicado en 1955 por C. De La Peña, es el menos conocido, a escala internacional, de entre los cinco métodos que se exponen en este apartado; sin embargo, es uno de los más empleados en nuestro país, por lo que consideramos necesario tener algunas nociones sobre su metodología. La aplicación más idónea del método De La Peña es en concretos estructurales de edificios, pavimentos, canales, depósitos de agua, puentes y, en general, concretos en los que las condiciones de ejecución puedan estimarse como buenas. Como en Füller y Bolomey, este método considera como tamaño máximo del agregado el de la abertura del tamiz más pequeño de la serie empleada que retenga menos del 25% de la fracción más gruesa del agregado.

Existen cientos de métodos para dosificar concretos. Un gran número de métodos propone curvas de referencia con el fin de determinar la proporción más idónea de gránulos que ha de tener el concreto. Entre ellos destaca Füller, cuyo método hemos resumido anteriormente, y Bolomey, que modificó la fórmula de Füller con el propósito de incluir al cemento y de conseguir una curva de granulometría variable en función de la consistencia y de la forma de los agregados.

8.3 Propiedades del concreto convencional

- Propiedades en el concreto fresco
- ✓ Manejabilidad

De acuerdo con el comité 211 del ACI, la manejabilidad o también llamada trabajabilidad hace referencia a aquella propiedad del concreto mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación dañina alguna.

De igual forma cabe aclarar que no existe ningún parámetro de medición mediante el cual se pueda establecer la manejabilidad de una mezcla de concreto en estado fresco. La evaluación de la manejabilidad resulta ser relativa y depende netamente de las facilidades mecánicas y manuales de las que se dispongan a la hora de realizar la mezcla. Actualmente, el método más eficaz existente mediante el cual es posible correlacionar la manejabilidad de las mezclas de concreto en estado fresco es a través de la prueba de revenimiento.

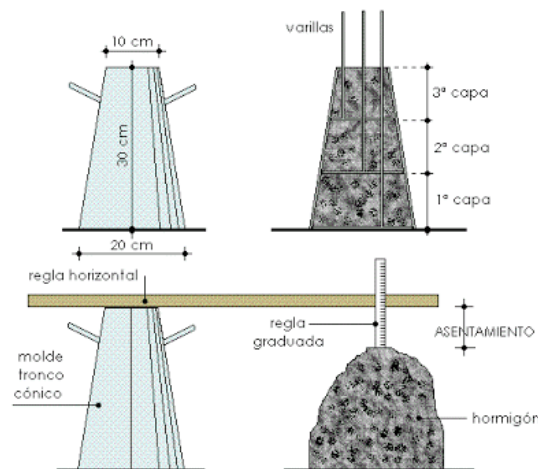


Figura 9 Prueba de revenimiento (Fuente: página electrónica "ingenieriyamas.com")

Se requiere que el ensayo para la determinación del asentamiento del concreto se realice en cada proceso de mezcla con el fin de corroborar que el asentamiento real obtenido en campo se encuentre dentro de los parámetros establecidos previamente en el diseño de mezcla (Figueredo & Padilla, 2017).

✓ Consistencia

La consistencia, está íntimamente ligada a la manejabilidad, aunque ambos son términos totalmente opuestos. Al igual que la manejabilidad, la consistencia de la mezcla de concreto en estado fresco también depende del grado de humedad y la relación agua cemento empleada en la dosificación de la mezcla. En términos generales se podría definir la consistencia como al estado de fluidez de la mezcla, es decir, que tan dura (seca) o blanda (fluida) es una mezcla cuando se encuentra en estado plástico (Sánchez de Guzmán, 2011).

✓ Plasticidad

Se denomina como “plasticidad” a una consistencia del concreto tal que pueda ser fácilmente moldeado, pero que le permita al concreto fresco cambiar de forma lentamente si se saca del molde. Por este motivo no deben ser consideradas como mezclas de consistencia plásticas aquellas que tienen una consistencia muy fluida o muy seca (Figueredo & Padilla, 2017).

○ Propiedades del concreto endurecido

✓ Físicas

➤ Pesos unitarios y apariencia del concreto

El peso unitario del concreto, al igual que el de otros materiales, está definido como la cantidad de masa por unidad de volumen y generalmente se expresa en kg/m. Por lo general el concreto convencional tiene un intervalo de pesos unitarios que va desde 2.240 a 2.400 Kg/m³, lo cual depende de la densidad de los agregados, la cantidad de aire atrapado o intencionalmente incluido y de la cantidad de agua y cemento contenida, que a su vez se encuentran influenciado por el tamaño máximo del agregado (Sánchez de Guzmán, 2011).

➤ Cambios volumétricos del concreto

El principal factor de agrietamiento en el concreto se debe a los cambios volumétricos que se presentan a lo largo de su periodo de vida útil, estos cambios se originan por causas internas o externas, restringiendo que cuando el concreto se encuentre bajo esfuerzos no supere la capacidad de resistencia a la tracción y falle produciendo el agrietamiento. Estos cambios se clasifican de acuerdo con la fuente que los produce que pueden ser de origen químico o físico.

Cuando el concreto se encuentra en fase de curado empieza a perder agua hasta alcanzar un endurecimiento moderado, durante este cambio de estado se producen cambios de volúmenes originando grietas de carácter superficial de severidad baja, sin embargo, cuando hay exceso de grietas los poros internos en el concreto con el exterior permiten el paso a los agentes químicos depositándose en estos corroyendo y penetrando la estructura. Por agentes climáticos el concreto tiende a dilatarse cuando aumenta la temperatura y a contraerse cuando esta baja, los cambios bruscos que se presentan en estas etapas exponen de igual forma al concreto agrietarse dando paso a la exposición a los agentes venéreos (Figueredo & Padilla, 2017).

✓ Mecánicas

➤ Resistencia del concreto

A pesar de los diferentes estudios realizados al concreto, aun no se establece una relación directa o una ley fundamental que valide y reafirme el comportamiento del concreto bajo los diferentes estados de esfuerzos a los que este es sometido, es por ello que previamente se realiza un diseño de mezclas para obtener un análisis estimado del comportamiento y la resistencia del concreto, la resistencia del concreto depende fundamentalmente de los materiales (agregados) usados para su realización, cada agregado es estudiado de forma independiente y clasificado a partir de sus propiedades inherentes, una vez se posean estos resultados y se mezclen como un material heterogéneo se establece la resistencia del concreto bajo ciertas condiciones de ejecución. De igual forma no solo las propiedades de los materiales varían la resistencia del concreto, también influyen otros factores tales como el mezclado de los materiales, el transporte, la compactación y el método de curado al que este sea sometido.

La resistencia de un concreto aumenta con la edad o días transcurridos desde su realización, este aumento se produce rápidamente durante los días siguientes a su colocación durante el transcurso del tiempo, y continuara incrementándose de forma más reducida durante un periodo de tiempo indeterminado, se estima que la resistencia a la compresión de un concreto es alcanzada a los 28 días de edad, y viene determinada a partir de los ensayos de normalización técnica (Figueredo & Padilla, 2017).

○ Resistencia a los esfuerzos sometidos del concreto

➤ Resistencia a la Compresión: Característica mecánica y de durabilidad principal del concreto, los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan principalmente para determinar que la mezcla de concreto cumpla con los requerimientos específicos de resistencia $f'c$ según el proyecto (Sánchez de Guzmán, 2011).

➤ Resistencia a la Tracción: El concreto tiene muy baja resistencia a la tracción y por lo tanto esta propiedad no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras convencionales. Sin embargo, la tracción tiene importancia en el agrietamiento del concreto debido a la restricción de la contracción inducida por secado o por disminución de la temperatura (Sánchez de Guzmán, 2011).

➤ Resistencia a la Flexión: Otra de las características mecánicas del concreto en estado endurecido, que reviste importancia, es su resistencia a la flexión, especialmente en estructuras de concreto simple, tales como pavimentos, en donde adicionalmente aparecen esfuerzos de tracción ocasionados por la flexión de las placas, al paso de los vehículos (Sánchez de Guzmán, 2011).

➤ Durabilidad del Concreto: La durabilidad del concreto se define como la capacidad de resistir los diversos agentes externos que pueden generar deterioros en el concreto, por lo que debe mantener su forma original, calidad y las propiedades intrínsecas de servicio, la durabilidad del concreto se puede ver afectada por diferentes factores ambientales los cuales pueden ser de origen químico o físico.

✓ *Agentes Químicos*

- Ataques por ácido: Debido a que el cemento no tiene ninguna propiedad de resistir a los ataques del ácido, por ende, el concreto es de igual forma débil ante este agente, el concreto se ve expuesto ante diferentes ácidos que se encuentran libres en el ambiente. Los morteros en concreto resultan afectados debido a que las soluciones acidas reaccionan en primer lugar con hidróxido de calcio y luego con hidro-silicatos e hidro-aluminatos de calcio de cemento endurecido para formar sales de calcio.
- Ataque por sulfatos: Los sulfatos que se encuentran presente en el suelo o agua, potasio, sodio y magnesio son los causantes de que el concreto se deteriore debido a que estos reaccionan químicamente con la cal y al aluminato de calcio hidratado en la pasta del cemento, formando sulfato de calcio y sulfa-aluminato de calcio, dicha reacción provoca expansión, que ocasionan esfuerzo de tracción interna que originan agrietamiento de la masa de concreto. Para prevenir el deterioro del concreto por acción de sulfatos se utiliza el cemento tipo II o tipo V dependiendo del grado de exposición al agente.
- Reacción álcali-agregado: Es una reacción química que se presenta entre agregados que contengan (óxido de sílice) y el cemento (hidróxido alcalino) produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdidas de características resistentes, cualquier agregado que contengan un contenido mayor al 0,6% de concentración de sílice se ve expuesto a presentar una reacción álcali-agregado.
- Carbonatación del cemento: Este fenómeno sucede cuando el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente en la pasta de cemento, en presencia de agua reacciona con el dióxido de carbono (CO_2) produciendo CaCO_3 (Carbonato de calcio), generando así una pérdida de volumen. Esta carbonatación se presenta en la superficie del concreto y su profundidad dependerá de la porosidad de la pasta. Esta reacción conduce al descascaramiento superficial (Figueredo & Padilla, 2017).

✓ *Agentes Físicos*

El concreto puede verse alterado por factores tales como el congelamiento o deshielo, donde se presentan cambios por temperatura los cuales afectan el volumen del concreto produciendo expansiones y fisuras volviendo a esta una situación crítica cuando se presenta como un fenómeno cíclico.

De igual manera al presentarse humedecimiento y secado se producen expansiones y contracciones que crean agrietamientos y descascaramiento aumentando la corrosión en los aceros de refuerzo, si el concreto se ve expuesto en movimientos de fluidos se genera fricción o cavitación produciendo un desgaste sobre la superficie del concreto; cuando se aumenta la resistencia a la compresión aumenta la resistencia a la abrasión; si el concreto se ve expuesto o es afectado por agentes de fuego, el concreto tiene buenas propiedades de resistencia y los daños en este son de carácter bajo, la resistencia al ataque del fuego depende del tipo de cemento, el contenido de humedad y el tipo de agregado utilizado en la mezcla (Figueredo & Padilla, 2017).

✓ Control de calidad del concreto

La calidad del concreto se puede definir como la aptitud de este para satisfacer una necesidad definida, al menor costo (Sánchez de Guzmán, 2011).

De la calidad del concreto depende muchos factores tales como la resistencia y durabilidad, el proceso de producción de concreto debe ser riguroso y estricto, dependiendo de la utilidad y necesidad que se requiera abarcar, un concreto con baja calidad en su proceso de producción será muy costoso para el proyecto del que se requiera; aunque de igual manera un concreto con excesivo control de calidad puede generar mucho desperdicio el cual no es beneficioso para nadie en términos económicos.

El control de calidad en la producción de concreto comienza con la selección de los posibles materiales a componer la mezcla, el cemento deberá cumplir con los requisitos de finura al igual con las especificaciones requeridas según su utilidad, en el caso de los agregados deben ser previamente estudiados para conocer sus propiedades y observar si este se encuentra o no contaminado por el medio y si es viable su utilización según el objeto del proyecto (Figueredo & Padilla, 2017).

9 Concretos de Alta Resistencia

La necesidad de conocer y utilizar concretos de Alto Desempeño y Ultra Alto Desempeño específicamente para puentes que necesitan mayor resistencia en su mezcla de concreto disminuyendo los efectos negativos sobre su estructura. **La diferencia entre estos dos tipos de concreto es que, aunque manejan la misma resistencia, el concreto de Ultra Alto Desempeño puede tener aplicaciones especiales arquitectónicas y de uso en estructuras.**

El Instituto Americano del Concreto define al Concreto de Alto desempeño como un concreto que cumple con los requisitos especiales de desempeño y uniformidad, que no pueden ser obtenidos usando solamente materiales convencionales y procedimientos normales de mezclado, colocación y compactación, así como, de curado. En un informe del Comité del Instituto Americano del Concreto de 1984, revisado en 1992, se seleccionó como límite inferior de resistencia para este tipo de concretos los **400 kg/cm²**, a partir del cual el procedimiento de control de calidad se vuelve más sensible y la atención cercana a cada fase de la producción del concreto se vuelve más importante.

Por otro lado el Departamento federal de administración de carreteras de los Estados Unidos (FHWA), define al concreto de alto desempeño como un concreto que es diseñado para ser más durable y si es necesario más resistente que un concreto convencional; y añade que estos están compuestos esencialmente de los mismos materiales que un concreto convencional pero diferenciándose en las proporciones, que son diseñadas para proveer la resistencia y durabilidad necesaria para los requerimientos estructurales y medioambientales del proyecto (Barriga, 2007).

En la Tabla 1, Antaine E. Naamán y Kay Wille, muestran de manera cronológica los avances en el mejoramiento de la matriz cementante y en el concreto, así como en las fibras utilizadas en su elaboración desde la década de los 1970 hasta la época actual. En la Tabla 2 se muestran los

desarrollos que a su parecer llevaron a la formulación del Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC, UHPC).

Tabla 1 “Mejoramiento de la Matriz Cementante”

Década	Matriz Cementante y Concreto	Fibra
1970's	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor entendimiento de las reacciones de las reacciones de hidratación, estructura de gel • Mejor entendimiento de las contracciones, el flujo plástico y la porosidad Se utiliza concreto de alta resistencia de 50 MPa en la práctica • Desarrollo de los reductores del agua • Avances en tratamientos para el concreto y condiciones de curado 	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras lisas; resistencia normal • Fibras de vidrio • Algunas fibras sintéticas
1980's	<ul style="list-style-type: none"> • Se incrementa el desarrollo de aditivos químicos: Reductores de agua de alto rango, etc. • Aumento de la fluidez (concreto autocompactable) • Reducción en la relación A/C • Terminología Concreto de Alta Resistencia: hasta 60 MPa; Alta Resistencia Especial: hasta 80 MPa; Alta Resistencia Exótica (agregado y curado especial): hasta 120 MPa • Terminología Concreto de Alto Desempeño: Concreto de Alta Resistencia con propiedades de durabilidad mejoradas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras deformadas: resistencia normal y alta • Fibras sintéticas de bajo módulo (polipropileno, nylon, etc.) • Aumento del uso de fibras de vidrio • Micro fibras • Fibras poliméricas de alto desempeño (carbón, Spectra, Kevlar, etc..)
1990's	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en el desarrollo de aditivos químicos: superplastificantes, agentes de viscosidad, etc. • Aumento del uso de materiales cementantes suplementarios como reemplazo del cemento • Concreto de Ultra Alto Desempeño: Aplicación del concepto de alta densidad de empaquetamiento, adición de partículas finas, baja porosidad, baja relación agua/cementante. • Concreto autocompactable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevas fibras enroscadas • Fibras de alcohol polivinílico con adhesión química con el concreto • Mayor disponibilidad de fibras sintéticas
	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de desarrollos de Concretos de Ultra Alto Desempeño comerciales y no comerciales 	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras de ultra alto desempeño: lisas y

2000's	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto de Ultra Alto Desempeño: Mejoramiento del entendimiento de alta densidad de empaquetamiento, aplicación de conceptos de nanotecnología 	<p>deformadas con diámetros tan pequeños como 0.12 mm y resistencias de hasta 3400 MPa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nano tubos de carbono, nano fibras de carbono
2010's	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de entendimiento de la matriz cementante a nano-escala 	<ul style="list-style-type: none"> • Nano fibras de carbono, grafeno.

El primer uso conocido del Concreto de Alto Desempeño, como un material de muy alta resistencia (>400 kg/cm²) fue para columnas de marcos en edificios de gran altura. Este tipo de concreto se generalizó en la década de los 80's ya que se utilizó en varias aplicaciones a pavimentos, puentes y estructuras marinas. Es importante señalar que este tipo de concreto tiene, a largo plazo un mejor comportamiento que el concreto convencional, en lo referente a las propiedades físicas, mecánicas y durabilidad.

Tabla 2 “Desarrollos en compuestos cementantes de alta resistencia y alto desempeño desde 1970 hasta la fecha”

Año	f'c (MPa)	Fuente/Referencia	Nombre	Condiciones Especiales
1972	230	Yudenfreund, Skalny, et al.		Pasta, mezclado al vacío, baja porosidad, especímenes pequeños
1972	510	Roy et al. (EUA)		Pasta, alta presión y alta temperatura, especímenes pequeños.
1981	200	Birchall et al. (Reino Unido)	MDF (libre de micro defectos)	Pasta, adición de polímeros, resistencia a la flexión de hasta 150 MPa
1981-1982	120-150	Bache, Hjorth (Dinamarca)	DENSIT, COMPRESSIT	Empaquetamiento de partículas mejorado, uso de micro sílice, uso de superplastificantes.
1980's	Hasta 120	Muchos investigadores	Concreto de Alta	Concreto con aditivos y agregados especiales para

		alrededor del mundo (Shah, Zia, Russell, Swamy, Malier, Konig, Aitcin, Malhotra)	Resistencia, Concreto de Alto Desempeño.	aplicaciones estructurales, uso de superplastificantes, curado normal, mejor durabilidad.
1980's	Hasta 210	Lankard, Naaman (EUA)	SIFCON (concreto infiltrado en forma de slurry)	Mortero de arena fina con altas adiciones de fibras (8 al 15% en volumen)
1987	Hasta 140	Bache (Dinamarca)	CRC (Concreto Compacto reforzado)	Concreto con alto volumen de fibras con barras de refuerzo
1987	Rango amplio	Naaman (EUA)	HPFRCC (Compuestos Cementantes de Alto Desempeño Reforzados)	Mortero y Concreto con fibras que provocan un desempeño de endurecimiento por deformación a la tensión
1991	Rango amplio	Reinhart and Naaman (Alemania, EUA)	HPFRCC (Primer Taller Internacional)	Con el objetivo de reducir el contenido de fibras
1992	Rango amplio	Li y Wu (EUA)	ECC (Compuestos Cementantes Ingenieriles)	Principalmente mortero con fibras sintéticas, desempeño de endurecimiento por deformación a la tensión
1994	Más de 150	De Larrad (Francia)	UHPC (Concreto de Ultra Alto Desempeño)	Material optimizado con empaquetamiento de partículas denso y partículas ultra finas
1995	Hasta 800	Richard y Cheyrezy	RPC (Concreto de Polvos Reactivos)	Pasta y concreto, curado con temperatura y presión, empaquetamiento de partículas
1998 y posterior	Hasta 200	Lafarge (Chanvilliard, Rigaud, Behloul) Francia	DUCTAL	Curado a 90°C por 3 días, fibras hasta el 6% (comercialmente disponible)
2000 y principios	Hasta 200	Muchos investigadores alrededor del mundo (Ulm, Graybeal, Rossi)	UHPC y UHP- FRC (Concreto de Ultra Alto Desempeño Reforzado Con Fibras)	Muchas formulaciones basadas en DUCTAL

2000 y principios	Hasta 200	Rossi et al. LCPC (Francia)	CEMTEC, CEMTEC Multi escala	Hasta 9% de fibras, combinaciones híbridas
2004	Rango abierto > 150	Fehling y Schmidt (Alemania)	Primer Simposio Internacional de UHPC	Muchas formulaciones similares al DUCTAL con y sin temperatura de curado, con y sin fibras
2005	Hasta 140	Karihaloo (Reino Unido)	CARDIFRC	Empaquetamiento y mezclado optimizados.
2005	Hasta 200	Jungwirth (Suiza)	CERACEM	Formulación similar al DUCTAL, fibras largas, agregados más grandes
2005	Abierto	Schmidt et al. (Alemania)	Construcción Sustentable con UHPC	La fundación de investigación Alemania, financió una iniciativa más amplia (2005-2012)
2008	Rango abierto > 150	Fehling y Schmidt (Alemania)	Segundo Simposio Internacional de UHPC	Muchas formulaciones similares al DUCTAL con y sin curado por temperatura, con y sin fibras
2011	>150	Accorsi y Meyer (EUA)	Taller de UHPC	Primer taller estadounidense
2011	Hasta 290	Wille y Naaman (EUA Alemania)	UHP-FRC	Sin curado por temperatura, empaquetamiento optimizado, resistencia a la tensión registrada directamente

La comunidad científica ha desarrollado un conocimiento general sobre los requerimientos de este material, las contribuciones de distintos autores se pueden resumir de la siguiente manera:

- Relaciones agua cemento (a/c) entre 0.16 y 0.27
- Utilización de aditivo fluidificante de alto rango basado en policarboxilatos.
- Extensibilidad de mini cono de revenimiento de entre 30 y 35 cm
- Cemento con una fineza moderada y una cantidad de *Aluminato tricálcico* que es un compuesto químico existente en el Clinker de los cementos Portland (de 7% a 15%)
- Microsílice con bajo contenido de carbón y dosificada en adición en masa con de 25% en relación al peso del cemento.
- Adición de microfibras de acero hasta 2.5% en adición con respecto al volumen del concreto

Se podría pensar que las aplicaciones de este diseño básico de mezcla de concreto de alto desempeño serían incosteable, pero existen otros factores más influyentes como la cantidad de material efectiva utilizado en la construcción, la vida útil y bajo qué condiciones estará trabajando, se deben tomar en cuenta para evaluar un material lejos de su costo inicial.

Aun cuando las principales aplicaciones del Concreto de Alto Desempeño y Ultra Alto Desempeño sean en su mayoría para la construcción de estructuras de puentes, su uso potencial puede extenderse a distintos tipos de aplicaciones como:

- Construcción de estructuras presforzadas sin refuerzo de acero pasivo.
- Tubos para el transporte de agua, aguas residuales u otros líquidos bajo presión.
- Bóvedas de seguridad, contenedores de desechos nucleares y estructuras de defensa y aplicaciones que requieren alta resistencia al impacto.
- Moldes de partes metálicas.

Con respecto a las ventajas técnicas que supone la utilización de este tipo de compuestos pueden enumerarse las siguientes:

- ✓ Mejor retorno de inversión
- ✓ Alternativas de diseño
- ✓ Espacios arquitectónicos
- ✓ Eficiencia del volumen de concreto
- ✓ Disminución de secciones en columnas
- ✓ Disminución de cargas muertas
- ✓ Funcionalidad
- ✓ Estética
- ✓ Durabilidad de las obras de infraestructura (ingreso de cloruros, ataque por sulfatos, etc.)

9.1 Concreto de Alto Desempeño (CAD)

En general el concreto de alto desempeño no es más que un concreto con capacidades extras que se adecua perfectamente a las necesidades actuales, mejorando su resistencia y durabilidad para la consecución de grandes obras de infraestructura física con un control de calidad más detallado. Este concreto provee a los diseñadores estructurales, a los arquitectos y a los constructores de novedosas soluciones técnicas y económicas (Salcedo Barrera, 2006).

A continuación, se enlistan las ventajas y desventajas más importantes:

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Permitir la reducción de las dimensiones y las cantidades de refuerzo, lo que facilita el manejo arquitectónico de los espacios, redundando en la economía de las obras y permite el uso de mayores luces y alturas en elementos estructurales • Facilitar la colocación y consolidación sin afectar resistencia • Características mecánicas a largo plazo • Alta resistencia temprana • Durabilidad • Estabilidad de Volumen • Agilizar la ejecución del programa de obra 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo del material • Mayor control del proceso constructivo. • Mano de obra más capacitada • Control estricto de materiales • Control estricto de tiempos • Demanda de excelente curado

Fuente: (Salcedo Barrera, 2006)

➤ *Método de diseño*

El método de diseño para un concreto de alto desempeño no está definido como tal, debido a las diferentes necesidades en resistencias y durabilidad que estos presentan, pero si se puede acoplar al diseño de mezcla de concretos de alta resistencia propuesto por el comité ACI 211.4, el cual sirve como parámetro a la hora de diseñar uno de alto desempeño.

Este método abarca el rango de resistencia 450 kg/cm^2 y 840.450 kg/cm^2 , y es aplicable a concretos de peso normal. Las consideraciones básicas de este método al igual que en el método para concretos convencionales es la determinación de la cantidad de los materiales requeridos para producir un concreto con las propiedades en estado fresco y endurecido deseadas y a un bajo costo.

El tiempo de mezclado para la fabricación de este tipo de concretos de alta resistencia es mayor que de un concreto convencional.

El procedimiento consiste en una serie de pasos, con los cuales se debe cumplir los requerimientos de resistencia y trabajabilidad deseados, el método recomienda elaborar varias pruebas en laboratorio y en el campo hasta encontrar la mezcla deseada (Barriga, 2007).

El procedimiento recomendado es el siguiente:

- a) El ensayo "Slump" o asentamiento del concreto o prueba del cono de Abrams es un método de control de calidad cuyo objetivo principal es medir la consistencia del concreto.

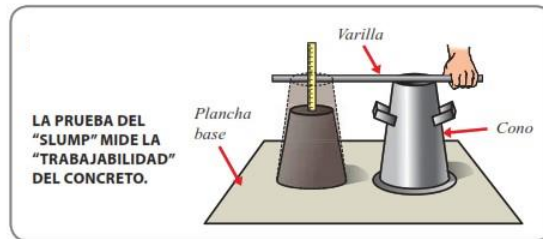


Figura 10 Ensayo Slump (Fuente: electrónica)

Se selecciona el slump y la resistencia del concreto requeridos, valores recomendados para el slump se muestran en la tabla 8. A pesar de que un concreto de alta resistencia es producido exitosamente con la adición de un superplastificante sin una medida inicial del slump, es recomendado un slump de 1 a 2" antes de adicionar el superplastificante. Esto asegurará una adecuada cantidad de agua para la mezcla y permitirá que el superplastificante sea efectivo.

Para un concreto elaborado sin superplastificante (SP) es recomendado un slump entre 2 a 4", este puede ser escogido de acuerdo con el trabajo a realizarse. Concretos con menos de 2" de slump son difíciles de consolidar dado el alto contenido de agregado grueso y materiales cementosos.

Tabla 10 Slump recomendado para concretos de alta resistencia con y sin superplastificante

Slump con SP	Slump sin SP
1" – 2" (Antes de la adición del SP)	2" – 4"

Nota. Fuente: (Barriga, 2007)

- b) Seleccionar el tamaño máximo del agregado, basados en los requerimientos de resistencia, el tamaño máximo del agregado grueso es dado en la tabla 9. El ACI 318 establece que el tamaño máximo de un agregado no debe exceder una quinta parte de la dimensión menor entre los lados del elemento, una tercera parte de la profundidad de la losa, o tres cuartas partes del mínimo espaciamiento entre las barras de refuerzo.

Tabla 11 Tamaño máximo del agregado grueso

Resistencia requerida del concreto (kg/cm ²)	Tamaño máximo del agregado
< 630	¾" – 1"
> 630	3/8" – ½"

Nota. Fuente: (Barriga, 2007)

- c) Seleccionar el contenido óptimo de agregado grueso, el óptimo contenido de agregado grueso depende su resistencia característica y tamaño máximo. El contenido óptimo recomendado de agregado grueso, expresado como una fracción del peso unitario compactado, como una función del tamaño máximo nominal.

El peso seco del agregado grueso por m³ de concreto puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$\text{Peso seco del agregado} = \%psagr * P.U.C$$

Ecuación 1. Peso seco del agregado. Fuente: (Barriga, 2007)

En un proporcionamiento de una mezcla de concreto normal, el contenido óptimo de agregado grueso es dado como una función del tamaño máximo y del módulo de fineza del agregado fino. Las mezclas de concretos de alta resistencia, sin embargo, tienen un alto contenido de materiales cementosos, y por lo tanto no son dependientes del agregado fino para lograr la lubricación y compactibilidad de la mezcla. Por supuesto los valores dados en la tabla 10 son recomendados para arenas que tienen un módulo de finura entre 2.5 a 3.2.

Tabla 12 Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (Módulo de finura A.F entre 2.5 y 3.2)

Tamaño nominal máximo	3/8"	1/2"	3/4"	1"
Fracción volumétrica Psag	0.65	0.68	0.72	0.75

Nota. Fuente: (Barriga, 2007)

- d) Estimar el agua de mezcla y el contenido de aire, la cantidad de agua por unidad de volumen de concreto requerida para producir un slump dado es dependiente del tamaño máximo, forma de las partículas, gradación del agregado, cantidad de cemento y tipo de plastificante o superplastificante usados.

Si se usa un superplastificante, el contenido de agua en este aditivo es tomado en cuenta para el cálculo de la relación agua/cemento: La tabla 12, da una primera estimación del agua de mezclado requerida para concretos elaborados con agregados de tamaño máximo entre 1" y 3/8", esta cantidad de agua es estimada sin la adición del aditivo, en la misma tabla también se da los valores estimados de aire atrapado.

Estas cantidades de agua de mezclado son máximas para un agregado bien gradado, angular y limpio que cumple con los límites de la norma ASTM C 33. Dado que la forma de las partículas y

la textura superficial del agregado fino puede influenciar significativamente su contenido de vacíos, el requerimiento de agua de mezclado puede ser diferente de los valores dados.

Los valores dados en la tabla 12, son aplicables cuando el agregado fino usado tiene un contenido de vacíos igual a 35%, el contenido de vacíos del agregado fino puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$V\% \left(1 - \frac{P.U.C}{\text{peso específico}} \right) * 100$$

Ecuación 2. Contenido de vacíos. Fuente: (Barriga, 2007)

Cuando el contenido de vacíos del agregado fino no es 35%, es necesario un ajuste a la cantidad de agua de mezclado, este ajuste puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$A \frac{kg}{m^3} = 4.72 * (V - 35)$$

Ecuación 3. Ajuste de agua de mezcla. Fuente: (Barriga, 2007)

Usando la ecuación anterior, obtenemos un ajuste de 4.72 kg/m³ por cada punto porcentual del contenido de vacíos de la arena.

Tabla 13 Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire del concreto basado en el uso de una arena con 35% de vacíos

Slump	Agua de mezclado en Kg/m ³ para los tamaños máximos de agregados gruesos indicados			
	3/8"	1/2"	3/4"	1"
1"-2"	183	174	168	165
2"-3"	189	183	174	171
3"-4"	195	189	180	177
Aire atrapado				
Sin superplastificante	3	2.5	2	1.5
Con superplastificante	2.5	2	1.5	1

Nota. Fuente: (Barriga, 2007)

- e) Seleccionar la relación agua/materiales cementosos, en las tablas 13 y 14, valores máximos recomendados para la relación agua/materiales cementosos son mostrados como una función del tamaño máximo del agregado para alcanzar diferentes resistencias a compresión en 28 o 56 días.

Los valores dados en la tabla 13 son para concretos elaborados sin superplastificantes y los dados en la tabla 14 para concretos con superplastificante. La relación agua/materiales cementosos pueden limitarse por requerimientos de durabilidad. Cuando el contenido de material cementoso excede los 450 kg, se debe considerar el uso de un material cementoso alternativo.

Tabla 14 Relación A/C para concretos sin superplastificante

Resistencia promedio F'Cr* Kg/cm2	Edad (Días)	Relación A/cm para los tamaños máximos de agregados gruesos indicados			
		3/8"	1/2"	3/4"	1"
		500	28	0.41	0.4
	56	0.44	0.43	0.42	0.42
550	28	0.36	0.35	0.34	0.34
	56	0.39	0.38	0.37	0.36
600	28	0.32	0.31	0.31	0.3
	56	0.35	0.34	0.33	0.32
650	28	0.29	0.28	0.28	0.27
	56	0.32	0.31	0.3	0.29
700	28	0.26	0.26	0.25	0.25
	56	0.29	0.28	0.27	0.26

*La resistencia promedio deberá ser reajustada para usar esta tabla con un valor de 0.9

Nota. Fuente: (Barriga, 2007)

Tabla 15 Relación A/C para concretos con superplastificante

Resistencia promedio F'Cr* Kg/cm2	Edad (Días)	Relación A/cm para los tamaños máximos de agregados gruesos indicados			
		3/8"	1/2"	3/4"	1"
500	28	0.49	0.47	0.45	0.42
	56	0.54	0.51	0.47	0.45
550	28	0.44	0.42	0.4	0.39
	56	0.49	0.46	0.43	0.41
600	28	0.4	0.38	0.36	0.35
	56	0.44	0.41	0.39	0.37
650	28	0.36	0.35	0.33	0.32
	56	0.4	0.38	0.36	0.34
700	28	0.33	0.32	0.31	0.3
	56	0.37	0.35	0.33	0.32
750	28	0.31	0.3	0.28	0.28
	56	0.34	0.32	0.3	0.3
800	28	0.29	0.28	0.26	0.26
	56	0.32	0.3	0.28	0.28
850	28	0.27	0.26	0.25	0.25
	56	0.3	0.28	0.27	0.26

Nota. Fuente: (Barriga, 2007)

- f) Cálculo del contenido de material cementoso: el peso del material cementoso requerido por m³ de concreto puede ser determinado por la división de la cantidad de agua de mezclado entre la relación a/c seleccionada. Sin embargo, si las especificaciones incluyen un límite mínimo en la cantidad de material cementoso por m³, este debe ser cumplido.
- g) Proporcionamiento de la mezcla de prueba base: para determinar las proporciones óptimas primero se debe realizar una mezcla base, los siguientes pasos deben ser seguidos para completar la mezcla:

1. Contenido de cemento. - Para esta mezcla, el peso del cemento será igual al calculado en el paso *f*.
 2. Contenido de arena. - Después de determinar los pesos por m³ de agregado grueso, cemento, agua, y contenido de aire atrapado, el contenido de arena puede ser calculado usando el método de volúmenes absolutos.
- h) Proporcionamiento de mezclas usando *fly ash* (cenizas volantes), este método incluye el uso de *fly ash* como adición al concreto, la adición de este reducirá la demanda de agua, reduce la temperatura, y reduce el costo. Este paso se describe la manera de adicionar al concreto este material y los pasos para su proporcionamiento, recomendando al menos dos pruebas con diferentes contenidos de este material.

Tabla 16 Ficha técnica: Curacreto ADITIVO IMPERMEABILIZANTE/ DENSIFICADOR PUZOLANICO

TABLA No. 1 FLY ASH TIPO F	PROPS. FISICAS	METODO ASTM
A) PRODUCTO ENVASADO (Pasa especificacion ASTM -618)		
A1. Consistencia	polvo fino	
A2. Toxicidad	no	
A3. Densidad (gm/cm3)	2.1 a 2.2	C-1240
A4. Inflamabilidad	no	
A5. Color	gris	
A6. Estabilidad		
Envase abierto (hrs)	6	
Envase cerrado (meses)	6	
A7. % Sólidos (Peso y Volumen)	100	
A8. Granulometría (seca)		
Retenido en malla No.325 (% máx.)	34	
Índice de actividad dureza con cemento Portland		
mín. (7 días % control)	75	C-618
mín. (28 días % control)	75	
Requerimiento de agua máx. (% control)	105	
A9. Constitución química		
Contenido de Silica (SO ₂) (% min.)	70	
SO ₃ (% máx.)	5.0	C-618
Humedad (% máx.)	3.0	
Pérdida en ignición (% máx)	6.0	
A10. Area específica (m ² /g)	20	C-1069
B) PRODUCTO APLICADO		
B1. Aumento de encogimiento por secado (%)	0.05	
B2. Reactividad con alcalis del cemento		C-311
Reducción de expansión del mortero (%)	85	C-441
B3. Resistencia a los sulfatos (% expansión)	0.05	C-1012
B4. Dosificación (% peso del cemento)	5 a 15	

Mezclas de prueba, para cada mezcla el proporcionamiento se hará siguiendo los pasos del a - h, una mezcla de prueba debe ser producida determinando su trabajabilidad y características de resistencia.

i) Ajuste de las proporciones de la mezcla, si las propiedades deseadas del concreto no han sido obtenidas en las mezclas de prueba, las proporciones de la mezcla base deben ser modificadas siguiendo el procedimiento siguiente:

1. Slump inicial. - Si el slump inicial no se encuentra en los rangos deseados, el agua de mezclado debe ser ajustada, el contenido de cemento debe ser corregido para mantener constante la relación a/mc , y el contenido de arena debe ser ajustado para asegurar el flujo del concreto.

2. Dosis de superplastificante. - Si un superplastificante es usado, debe ser determinado su efecto en la trabajabilidad y resistencia. Se debe seguir las indicaciones dadas por el fabricante en cuanto a su tasa máxima de uso. El uso en laboratorio de superplastificantes debe ser ajustado para su uso en campo.

3. Contenido de agregado grueso. - Una vez que la mezcla de prueba de concreto ha sido ajustada para el slump deseado, se debe determinar si la mezcla es demasiado áspera. Si es necesario el contenido de agregado grueso puede ser reducido y el contenido de arena ajustado. Sin embargo, este incremento del contenido de arena incrementara la demanda de agua, y por lo tanto el contenido de cemento.

4. Contenido de aire. - Si el contenido de aire difiere significativamente de las proporciones deseadas, el contenido de arena puede ser ajustado.

5. Relación a/mc . - Si la resistencia requerida no es alcanzada, mezclas adicionales con una menor relación a/mc deben ser elaboradas.

j) Selección de la mezcla optima, una vez que las proporciones de mezcla han sido ajustadas para producir la trabajabilidad y resistencia deseadas, es necesario realizar pruebas en las condiciones de campo de acuerdo a los procedimientos recomendados por el ACI 211.1.

➤ *Clases de concretos de Alto Desempeño*

Se pueden clasificar de maneras diferentes de acuerdo con el resultado esperado o con los materiales usados.

- ❖ Según edad de adquisición de resistencia (Salcedo Barrera, 2006)
- ❖ Concreto de alta resistencia inicial

Denominado concreto super acelerado, corresponde a aquellos que poseen una alta velocidad de adquisición de resistencia, llegando a 42 MPa a los tres días; estos se logran a partir de cementos portland tipo III, cementos de fraguado extra rápido, de ultra alta resistencia rápida, mezclados con aditivos acelerantes y reductores de agua, adiciones de microsilice, ceniza volante o escoria y de tamaños máximos de agregado grueso de 25.4 y 12.5mm, triturados y de textura rugosa.

- Concretos de alta resistencia final

Corresponden a concretos cuya resistencia a la compresión a los 56 y 90 días excede los 42 MPa y cuya velocidad de adquisición de resistencia es baja a edades tempranas (antes de siete días), aunque posteriormente el crecimiento es mayor comparado con concretos convencionales; estos se obtienen utilizando cemento Portland tipo I en altas cuantías, agregados triturados rugosos de tamaño máximo entre 12.5 y 19mm, adiciones minerales y aditivos reductores de agua.

- ❖ Según los materiales utilizados (Salcedo Barrera, 2006)
- ❖ Con altos contenidos de cemento

Obtenido con una dosificación de altas cuantías de cemento, alcanza altas resistencias a todas las edades, sin inclusión de aditivos ni adiciones. Pueden utilizarse cementos tipo I y III, obteniéndose mezclas con baja trabajabilidad y consistencia plástica que requieren buena compactación.

- ❖ Con agregados y cementos especiales

La dosificación incluye cementos Portland tipo III o cementos especiales de fraguado extra rápido y ultra resistencia, lo que permite elevadas resistencias a edades tempranas. La manejabilidad de esta mezcla depende del tipo de aditivos utilizados y se pueden usar agregados naturales y artificiales.

- ❖ Con aditivos y adiciones

Incluyen el uso de aditivos y adiciones en las dosis recomendadas por cada fabricante, conjuntamente con el cemento, agua y agregados. La obtención de mezclas a partir de la combinación de aditivos y adiciones para obtener concretos de alto desempeño parece ser la más indicada por el beneficio económico.

9.2 Concreto de Ultra Alto Desempeño (CUAD)

El cemento recomendado Portland para los CUAD desde el punto de vista de la composición química es uno que contenga un bajo contenido de aluminato tricálcico (C3A) significativamente menor que el 8%, una baja fineza de Blaine debido a que requieren de menos agua y la relación agua/cemento puede reducirse más. Otro efecto que se ha reportado en el concreto hecho con cemento con un alto contenido de C3A, es que éste reacciona con los aditivos superfluidificantes base policarboxilato, los cuales son los más usados en el concreto de ultra alto desempeño, debido a que el radical COO⁻ que existe en los aditivos reacciona formando compuestos órgano-minerales.

Se ha visto que el calor máximo de hidratación de concreto de cementos binarios/terciarios (ceniza volante y/o escoria granulada) se reduce con materiales cementantes suplementarios, como resultado, el concreto de materiales cementantes suplementario genera un menor riesgo de fractura térmica que el concreto de cemento portland.

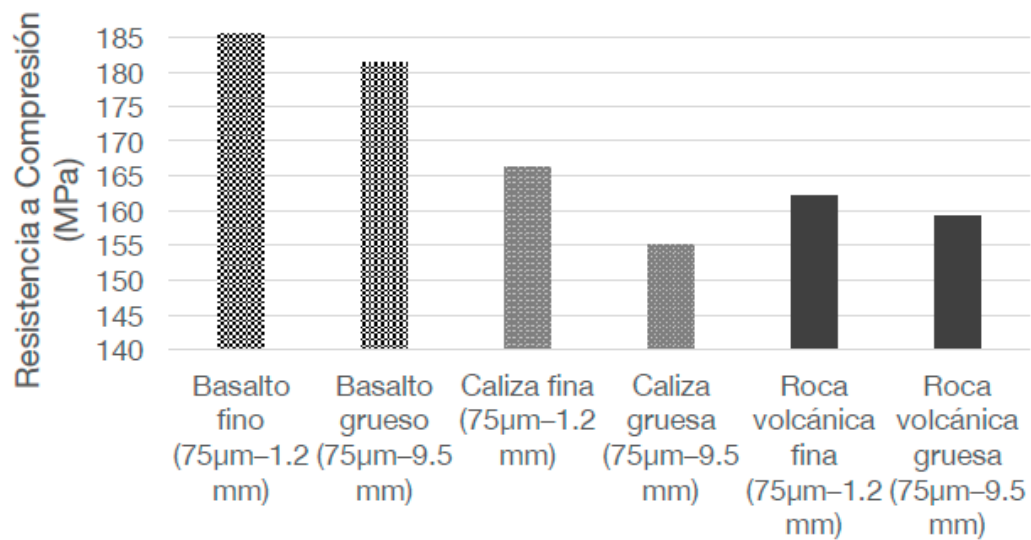
Con respecto a la cantidad de cementante que se debe usar en mezclas de concreto de ultra alto desempeño Wang, investigó el efecto de la relación volumétrica cementante/agregado variando el contenido de 500 kg/m³ hasta 900 kg/m³ de cementante. Llegó a la conclusión de que es necesario mantener alto el volumen de pasta para ganar fluidez y desempeño de ultra alta resistencia.

- Desempeño de los materiales
 - ❖ Agregados
1. Dureza de los agregados: Según Richard y Cheyrezi uno de los problemas principales en el concreto es la falta de homogeneidad por lo que propone lo siguiente:
 - Eliminación de los agregados gruesos, reemplazados con arena fina, de 600 micrómetros de tamaño máximo.
 - Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la pasta.
 - Reducción en la relación agregado/matriz.

Los agregados en el concreto conforman un conjunto de inclusiones rígidas en la matriz. Cuando se aplica una fuerza de compresión aparecen esfuerzos de tensión y cortantes en la interface pasta/agregado que genera rajaduras en la pasta.

2. Collepardi: demostró que el uso de un agregado bien graduado de 8 mm. de tamaño máximo puede reemplazar a la arena fina de cuarzo de tamaño micrométrico propuesto por Richard y Cheyrezy para el concreto de polvos reactivos. En su estudio fabricó concreto con agregado calizo bien graduado y lo comparó con un concreto de polvos reactivos convencional, el cual contuvo arena de cuarzo molida finamente. Concluyó que la adición de agregado graduado no reduce la resistencia a compresión provista por la calidad de la matriz cementante, este estudio contrasta con la visión original del concreto de polvos reactivos.
3. Chong: se fue al extremo al incluir agregado grueso de tamaño máximo de 19 mm en su intento de producir un concreto de ultra alto desempeño que pudiera fabricarse con tecnologías comunes. Señala en su estudio que al incluir polvo de caliza. La hidratación de la alita se ve acelerada y que a su vez ésta mejora la compactación y dispersión del hidróxido de calcio en el gel de C-S-H al igual que juega un papel importante en la cristalización. Sin embargo, en general, para todos los CUAD se obtienen mejores resultados con agregados más finos sin importar su origen, como se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17 Agregados más finos sin importar su origen, aplicados a los CUAD



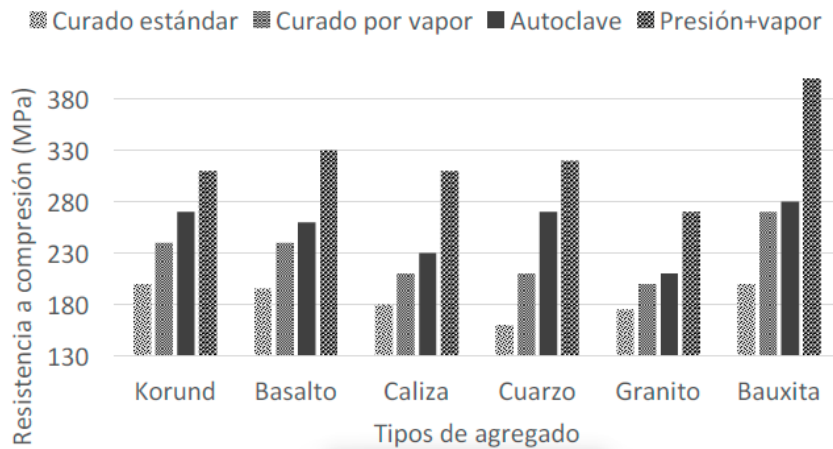
La evaluación de la resistencia a compresión de un agregado a través de la prueba de núcleos de roca sólida no es clara. En las formaciones rocosas existen de manera cotidiana planos preferenciales de falla provocados por el proceso de consolidación de la misma. Al triturar el agregado y reducirlo a partículas pequeñas, es posible que éstos ya no signifiquen un problema. La experiencia ha mostrado, sin embargo, que la bauxita sinterizada, el korund, el basalto y el cuarzo tienen relativamente mucha mayor resistencia que la caliza y el granito.

En la Tabla 17 se puede observar la resistencia a compresión del núcleo para cuatro diferentes tipos de roca y en la gráfica 3 se presenta una comparación que ilustra la influencia de seis diferentes agregados en la resistencia a compresión de los CUAD sometidos a cuatro diferentes regímenes de curado.

Tabla 18 Resistencia a la compresión de núcleos de roca

	Basalto	Caliza	Cuarzo	Granito
Resistencia compresión (MPa) ^a	252	83	70	102

El impacto del tipo de agregado es más sensible en el concreto de alta resistencia. La energía de fractura, rigidez y resistencia del concreto depende significativamente del tipo de agregado con el que se fabrica.



Gráfica 3 Influencia de agregado a compresión de los CUAD

Reda comparó las propiedades de un concreto de ultra alto desempeño fabricado con caliza contra las propiedades de uno fabricado con bauxita sinterizada. Entre sus conclusiones está que con un 35% de volumen de pasta se pueden alcanzar resistencias de 200 MPa si el agregado es bauxita, por el contrario, para alcanzar el mismo desempeño con agregado calizo sería necesario que la pasta ocupara del 60 al 70% del volumen del concreto. El uso de agregado calizos para la fabricación de Concretos de Ultra Alto Desempeño no es generalizado, sin embargo, es posible encontrar algunos reportes en la literatura como se puede observar en la Tabla 18.

Tabla 19 Diseños de Mezclas de Ultra Alto Desempeño con Agregado Calizo

	M.M Reda et al. (1999) [11]	Aydin et al. (2001) [9]	Durán (2003) [13]	Collepari (2004) [10]	Camacho (2012) [15]	Wang (2012) [12]	Wille (2015) [6]
Cemento (kg/m ³)	1040	940	760	937	850-635	810	778
Humo de sílice (kg/m ³)	310	282	190	235	85-63.5	90	188
Agregado relativamente grueso (kg/m ³)	800	960	991	1031	0-600	1539	1129
Agua (kg/m ³)	240	125	218.5	200	200	162	179
Superplastificante (kg/m ³)	27 (polvo)	61	23.94 (polvo)	43	ND	18	27
Tipo de cemento	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 3	Tipo 5	Tipo 5	Tipo 1	Blanco
Polvo	Arena de Ottawa+harina de sílice	-	-	-	Arena sílica	Arena caliza	Ceniza volante (183)
Fibras	-	-	-	-	2%	-	-
Tamaño del agregado (mm)	4 a 6	4	9.5	8	2	20	1.2
Curado	Sin curar	Estándar, Vapor, Autoclave, Presión+Vapor	Estándar	Estándar, 90 °C, 160°C	Estándar	Estándar	Estándar
Relación a/c	0.23	0.13	0.29	0.21	0.20125	1.9	.24
Relación Microsílice/Cemento (a/c)	0.30	0.30	0.25	0.25	0.15	0.11	.24
Resistencia (Mpa)	140	180, 210, 230, 310	92.6	160,175, 200	160	137	166
Compactación	Vibrado	Vibrado	Vibrado	Vibrado	Autocompactable	Vibrado	Autocompactable

Distintos intentos se han hecho por obtener una mezcla granular óptima, entre ellos el más comúnmente usado es el recomendado por el ACI 211.1, que sugiere un volumen de agregado grueso en función del módulo de finura de la arena y el tamaño máximo del agregado apoyándose en que las granulometrías de los agregados deben estar de acuerdo a los límites del estándar ASTM C33. A pesar de su popularidad ha sido propuesto que su utilización no necesariamente da los mejores resultados posibles

En el año 2000, El instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, publico en su revista **“Construcción y Tecnología”** el siguiente artículo en el cual se destaca lo siguiente:

El laboratorio de Construcción de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) realizó pruebas en la elaboración de mezclas de concreto de alta resistencia, llevándolas a cabo los ingenieros Antonio Flores Bustamante, Francisco González Díaz, Luis Rocha Chiu y M. en I. Adán Vázquez Rojas, en los que se logró alcanzar valores de hasta 900 kg/cm^2 de resistencia a la compresión, determinando, también, dosificación, procedimientos de mezclado y métodos de prueba.

Es conveniente destacar que los resultados fueron parciales y que las resistencias logradas a la fecha se han obtenido mediante procedimientos sin control de calidad "rigurosos", como generalmente lo recomiendan la mayoría de los especialistas vinculados con estos materiales.

De acuerdo con las fuentes de información anteriormente estudiadas, se requieren al menos las siguientes características en los materiales que componen el concreto:

- Cemento. Son recomendables los tipos I y II, con contenidos significativos de silicato tricálcico (mayores que los normales), módulo de finura alto y composición química uniforme.
- Grava. De alta resistencia mecánica, estructura geológica sana, bajo nivel de absorción, buena adherencia, de tamaño pequeño y densidad elevada.
- Arena. Bien graduada, con poco contenido de material fino plástico y módulo de finura controlado (cercano a 3.00).
- Agua. Requiere estar dentro de las normas establecidas.
- Mezcla. Relaciones agua/cemento bajas (de 0.25 a 0.35), mezclado previo del cemento y del agua con revolvedora de alta velocidad, empleo de agregados cementantes, período de curado más largo y controlado, compactación del concreto por presión y confinamiento de la mezcla en dos direcciones.
- Aditivos. Es recomendable emplear alguno o una combinación de los aditivos químicos: superfluidificantes y retardantes; y, de los aditivos minerales, ceniza volante (fly ash), microsilica (silica fume) o escoria de alto horno.

Mezcla de prueba. Con los ensayos y características obtenidos de cada uno de los componentes del concreto, se procedió a diseñar una mezcla base de concreto normal para una resistencia a la compresión de 400 kg/cm^2 y, al mismo tiempo, comparar el agregado grueso en las condiciones de granulometría que presentaba directamente del banco y efectuando lavado y cribado en el mismo para disminuir su cantidad de finos e impurezas. El resultado, en términos generales, arrojó resistencias superiores de 15 por ciento a favor de la grava controlada, lo que nos permitió concluir que los agregados gruesos con buen control de calidad son deseables en este tipo de concretos.

Procedimiento de mezclado. A partir de la dosificación de la mezcla base, se realizaron mezclas combinando aditivos minerales y químicos (microsilica y superfluidificante), empleando diferentes procedimientos de mezclado. La técnica de mezclado que en esta etapa ofreció el mejor resultado fue la que se describe a continuación:

1. Agregado grueso (caliza)
2. Agua (15%)
3. Agregado fino (arena)
4. Cemento
5. Microsílica
6. Agua (85%)
7. Aditivo químico
8. Cuatro litros de agua adicionales a la calculada para la mezcla

El empleo de la dosificación base, de la técnica de mezclado y el control de la granulometría y lavado del agregado grueso permitió incrementar la resistencia a la compresión en 25 por ciento sobre la de la mezcla base.

Aditivo químico. En las mezclas descritas anteriormente se consideraron cantidades fijas de los aditivos químicos y minerales. La siguiente etapa del experimento consistió fundamentalmente en aproximaciones sucesivas, variando la cantidad del aditivo químico y efectuando cambios pequeños en el procedimiento de mezclado, lo que en principio originó resistencias adicionales de 10%. Empleando grava cribada y lavada y un ajuste en la cantidad del aditivo químico, se obtuvieron pequeños incrementos en la resistencia, pero sobre todo disminuyó la variabilidad de los resultados.

Aditivo mineral. Una reducción controlada en el proporcionamiento de la microsílica cercana a una tercera parte arrojó resistencias similares, con la consecuente economía en el costo de la mezcla. El empleo de dos aditivos químicos mezclados en proporciones iguales y manteniendo la cantidad original de microsílica dio 15% de resistencia adicional.

Relación agua/cemento. La relación agua/cemento permaneció sin modificaciones durante todas las etapas descritas con anterioridad. En las últimas pruebas se agregó un poco más de cemento, resultando resistencias del orden de los 800 kg/cm^2 .

Se aprecian de manera sintetizada los progresos alcanzados en la resistencia conforme se fueron variando los procedimientos de mezclado y la composición de la mezcla. Desde luego, se presentan las mezclas más representativas del trabajo de investigación.

El procedimiento de mezclado que ofreció los mejores resultados en altas resistencias a la compresión fue el siguiente:

1. Agregado grueso (caliza o basalto)
2. Agua (15%)

3. Microsílica
4. Agua (25%)
5. Cemento (50%)
6. Agregado fino (arena)
7. Agua (20%)
8. Cemento (50%)
9. Agua (30%)
10. Aditivo químico diluido en el 10 % sobrante de agua

Es oportuno indicar que se presentaron problemas en el momento de efectuar las pruebas de compresión en los concretos de resistencias mayores a 500 kg/cm^2 . Se consideró que la causa podría ser que el material con el que se realiza el cabeceo de los cilindros no era lo suficientemente resistente para soportar las cargas a las que se sometía el cilindro de concreto.

➤ *Durabilidad de los CUAD*

Un estudio reportado (Racky), donde los autores examinan las propiedades del concreto normal y de alto desempeño con relación a una de ultra alto desempeño. En su análisis comparan el consumo energético y de materia prima de la fabricación de una columna a compresión los cuales son presentados en la Tabla 19. Al ser presentada de esta forma la información es posible saber de la mejor manera qué es lo que implica hacer un elemento de ultra alta resistencia, aunado a sus ventajas adicionales, como lo son la reducción de la cantidad de acero, entre otras.

Tomando en consideración los datos de la tabla puede observarse ventajas del UHPC con respecto a los concretos ordinarios y de alto desempeño, tanto en el consumo energético como en el uso de materias primas. Debe notarse igualmente que al reducir el volumen del concreto se reducen también las cargas que llegarán a las cimentaciones, por ende, las cimentaciones podrán ser menos robustas y con la reducción del volumen de concreto se tendrá un mayor espacio disponible para su uso con lo que aumentará la plusvalía de la edificación, esto sin tomar en cuenta la vida útil de la estructura.

Tabla 20 Consumo de energía y materia prima para una columna de concreto reforzada de acuerdo a la clase de concreto (Carga muerta 40 MN, longitud 3.5 metros)

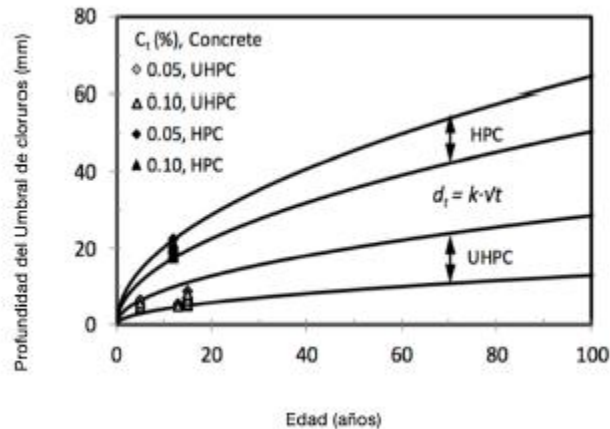
Clase de Resistencia del Concreto		C 40/50 MPa	C 80/95 MPa	C 180 MPa
Sección de la columna de concreto	m ²	1.0	0.67	0.44
Volumen de concreto	m ³	3,360	2,258	1,464
Sección del acero de refuerzo	cm ²	400	270	174
Volumen de acero	m ³	0.140	0.095	0.061
Peso de acero	T	1.08	0.74	0.47
Consumo energético				
Concreto	MJ	6,693	5,701	8,616
Acero de refuerzo	MJ	11,745	8,048	5,111
Total	MJ	18,438	13,749	13,727
Consumo de materia Prima				
Concreto	to	8.13	5.37	5.71
Acero de refuerzo	to	6.91	4.74	3.01
Total	to	15.04	10.11	8.72

Hablando de la durabilidad de este tipo de materiales, podemos encontrar un ejemplo en el estudio realizado Michael Thomas donde se evaluó el desempeño de tres series de Concretos de Ultra Alto Desempeño que constaron de vigas de 152x152x533 mm. y se dejaron al nivel medio de la mara en un sitio de exposición marina en la Isla Treat en Maine durante 15 años. Según los autores la isla Treat supone condiciones de exposición muy severas al presentarse en ella mareas muy severas de alrededor de 6 metros al igual que ciclos de congelamiento-deshielo (más de 100 al año).

En laboratorio se determinaron el coeficiente de difusión a los cloruros por la norma ASTM C1556 y la "permeabilidad a los iones cloro" a través de la norma ASTM 1012. Se obtuvieron valores entre 0 y 19 coulombs para la prueba de permeabilidad a iones cloro, lo cual indica una permeabilidad despreciable, y un coeficiente de difusión de $D=1.3 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, el cual es alrededor de dos órdenes de magnitud menor que el del concreto normal.

Con respecto a las pruebas de desempeño en ambiente real, se midieron la profundidad a la cual los cloruros habían alcanzado el umbral de cloruros (0.05 y 0.1% en masa de concreto según los autores) para las probetas expuestas para los Concretos de Ultra Alto Desempeño (RPC-USACE, UNB-FM, VHSCUSACE) y un Concreto de Alto Desempeño (HPC) como referencia. Tomando en cuenta que la difusión sea el mecanismo dominante del transporte de los cloruros en el concreto y que el coeficiente de difusión no cambiara con el tiempo, los autores asumieron que la penetración de la concentración del umbral de cloruros es proporcional a la raíz UHPC del tiempo, se graficó la profundidad del umbral con respecto al tiempo para los concretos probados.

El comité ACI 318 recomienda que la profundidad a la que tiene que estar el refuerzo embebido en el concreto debe ser de 7.5 cm cuando el concreto está expuesto a ciclos de humedecimiento y secado; podemos hacer un estimado de la vida útil de estos concretos a partir de los datos plasmados en la gráfica 4.

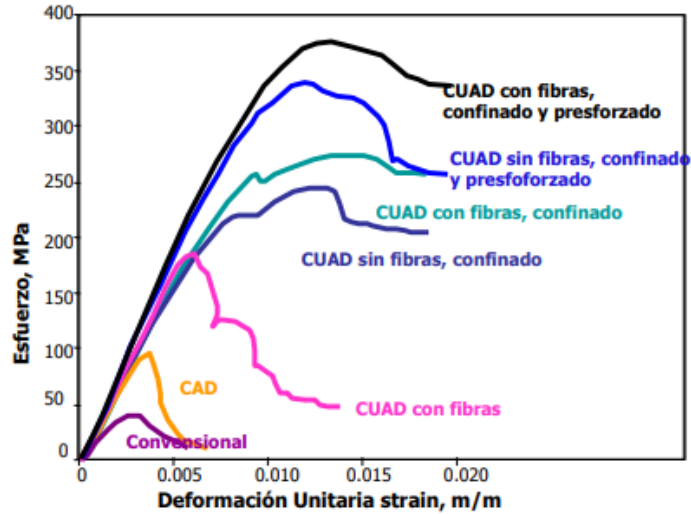


Gráfica 4 Velocidad de penetración del Umbral de cloruros para CAD Y CUAD

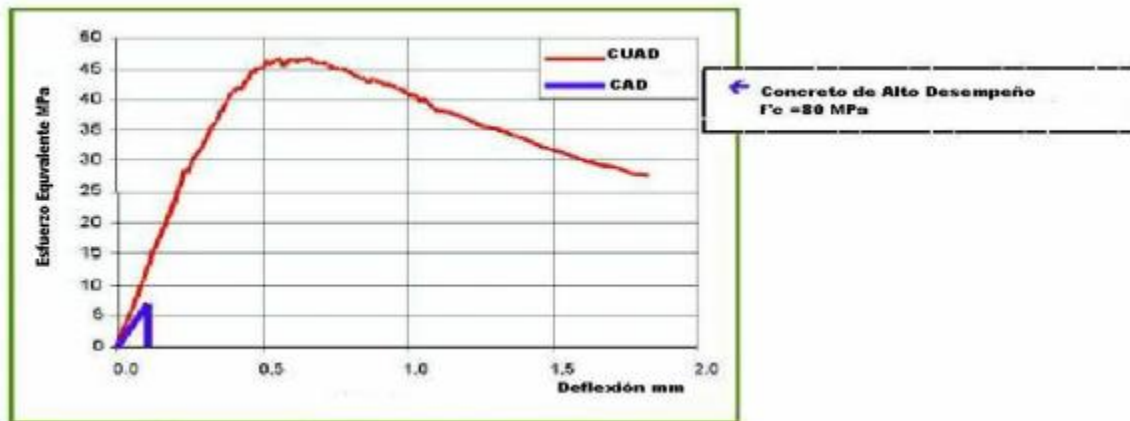
Para los concretos de alto desempeño se tendría una vida útil estimada de alrededor de 150 años, mientras que para un concreto de ultra alto desempeño la vida útil con respecto a la penetración de cloruros sería muy difícil de estimar puesto que aparentemente sería ilimitada.

Debido a la relativa novedad de la disponibilidad del UHPC de manera comercial (el Ductal, estuvo disponible a partir de 1998), todavía no se tienen resultados a 50 años que pudieran confirmar la aparente impermeabilidad del concreto; pero asumiendo conservadoramente una vida útil de 200 años se estaría hablando de un concreto que requiere significativamente un menor volumen para la construcción de secciones estructurales y el cual además tiene una vida útil al menos cuatro veces mayor que un concreto normal, siendo así éste más sostenible.

Finalmente, en la comparativa de los comportamientos de la compresión y flexión de los concretos convencionales, los CAD y los CUAD podemos observar la gran diferencia gracias a las propiedades que cada uno posee, sobre todo los CUAD muestra un comportamiento elástico-línea:



Gráfica 5 Comportamiento a la compresión de los diferentes tipos de concretos (Fuente: Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas, 16-19 de noviembre de 2005, Concepción – Chile)



Gráfica 6 Comportamiento a la tensión (Fuente: Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas, 16-19 de noviembre de 2005, Concepción – Chile)

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. En la gráfica 6 podemos ver que 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, permitiendo de los concretos de ultra alto desempeño tengan.

9.2 Caso de Aplicación: “Puente Superior Vehicular Entronque Monterrey-Cadereyta”

Como se ha mencionado anteriormente todas las características, propiedades y métodos de estudio nos han dado un panorama de este material de gran importancia para la construcción (Concretos de alta resistencia), sin embargo, el utilizar mezclas de altas resistencias, no lo es todo, debe de ir acompañado de otros materiales que beneficien el proyecto, como el acero, etc. En México existen varias obras que se han visto en la necesidad de recurrir a las altas resistencias, entre muchos, un caso particular es el que se describe a continuación:

- En 2019, La Red Estatal de Autopistas de Nuevo León, “PUMASA S.A.” desarrolló el diseño de la ingeniería estructural de un puente superior vehicular (PSV) de cuatro carriles que cruza aproximadamente sobre el “km 69+400 al km 69+460” de dicho proyecto, la carretera Monterrey-Cadereyta, ubicado en el municipio de Cadereyta Jiménez en el estado de Nuevo León.



Figura 11 Ubicación en entronque Monterrey – Cadereyta

- La estructura del PSV consta de dos claros, de 41.00m. Para una longitud total del puente de 82.00m aproximadamente. La superestructura está conformada por 15 traveses tipo VI. Dichas traveses trabajan en conjunto con una losa maciza de 0.20m, teniendo dos anchos de calzada de 13.325m separados por una guarnición central de 0.45m, guarniciones de 0.45m, para tener un ancho total de la superestructura de 28.00m.

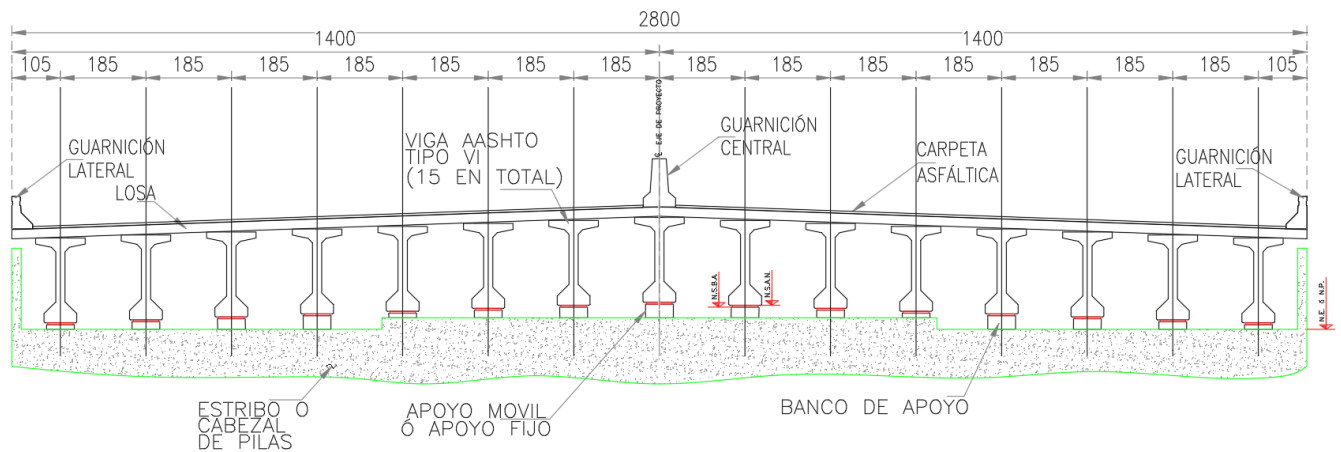


Figura 12. Sección Transversal Superestructura del Puente

- La subestructura consta de 2 estribos extremos y una pila intermedia, los estribos están conformados por cabezales y el cuerpo del mismo que se desplanta sobre una losa de cimentación que a su vez se apoya sobre pilotes de cimentación que se prolongan por debajo del terreno natural para trabajar como cimentación profunda, la pila central está conformada por 8 columnas circulares, las cuales se desplantan sobre una losa de cimentación que a su vez se apoya sobre pilotes de cimentación que se prolongan por debajo del terreno natural para trabajar como cimentación profunda.

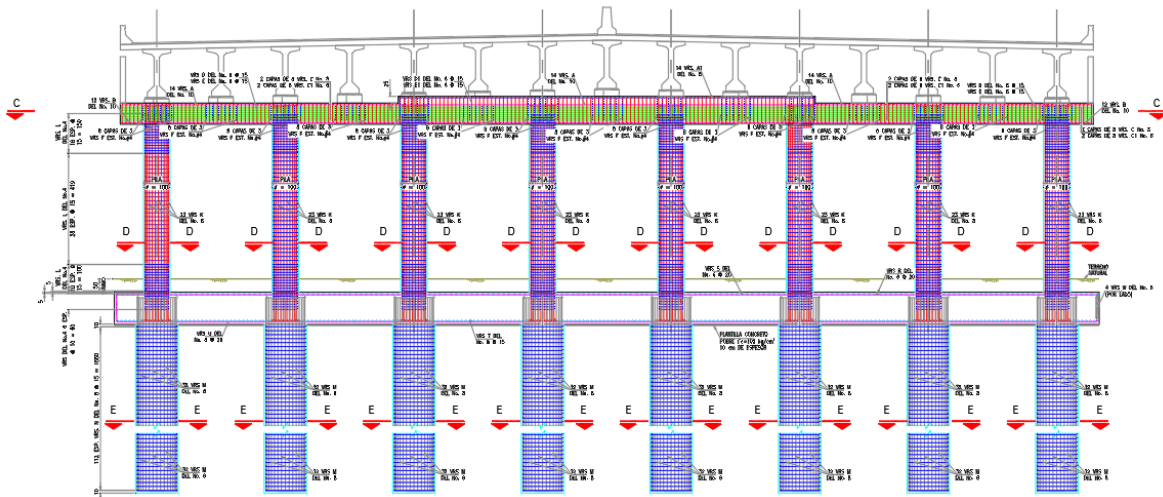


Figura 13 Elevación frontal de pilas y cabezal

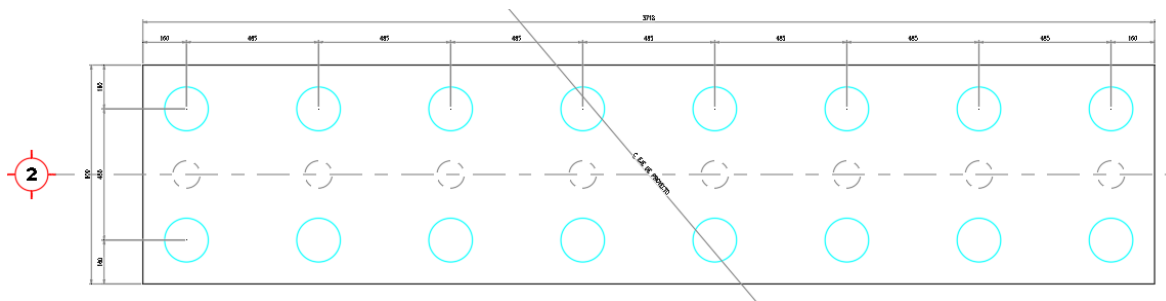


Figura 14 Vista en planta de zapata de cimentación con apoyo central

- Los apoyos extremos ^{3^a}son del tipo estribo (muro tipo pantalla) de concreto reforzado. El estribo del eje 1 tiene un espesor constante de 1.0m, y se desplanta sobre 20 pilotes a una profundidad de 17m (10 pilotes de 1.4m diámetro y 10 de 1.2m), ligados por una losa de cimentación de 1m de espesor. Por la configuración del terreno se optó por utilizar aleros de 5m de longitud en cada extremo del estribo. El estribo del eje 3 tiene un espesor variable, con un espesor de 1.5m de ancho en los primeros 2 m, y de 1.2 m en la altura restante. Se desplanta sobre 16 pilotes de 1.6m de diámetro a una profundidad de 15 m, ligados por una losa de cimentación de 1.2 m de espesor.

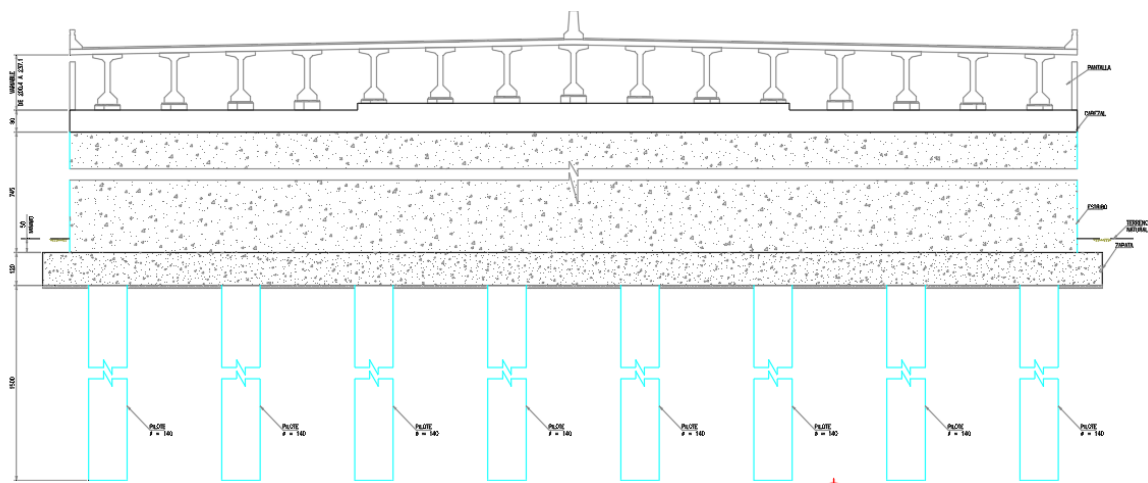


Figura 15 Elevación eje 3

- Características mecánicas y propiedades del concreto utilizado
- Concreto

Tabla 21 Resistencias del concreto

	$f'c$ (kg/cm ²)	γ (kg/m ³)
Cimentación (Losa)	350	2400
Columnas (Pilas)	350	2400

Muros (Estribos)	350	2400
Cabezal	350	2400
Trabes Preesforzadas	500	2400
Losa superestructura	250	2400
Guarnición, banqueteta, y losa de acceso	250	2400
Plantillas	100	2400

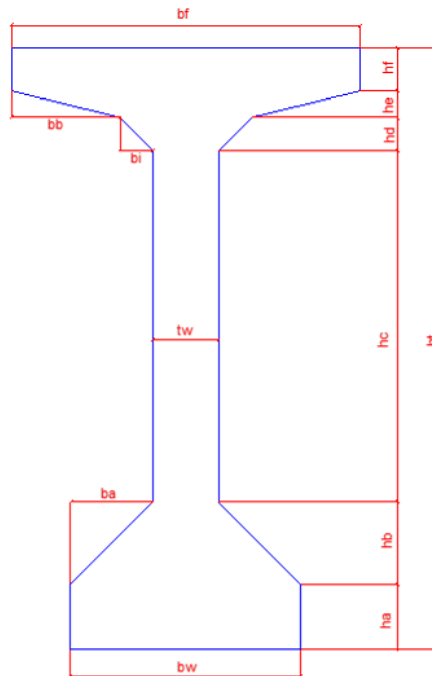
Nota: La resistencia mínima del concreto al momento del tensado de las trabes presforzadas deberá ser de 400 kg/cm²

Tabla 22 Características

➤ <i>Acero de refuerzo</i>	
Esfuerzo de fluencia	$f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de elasticidad	$E_s = 2,039,000 \text{ kg/cm}^2$
Peso volumétrico	$\gamma = 7,850 \text{ kg/m}^3$
➤ <i>Recubrimientos</i>	
Losa de cimentación (recubrimiento superior):	7.5 cm
Losa de cimentación (recubrimiento inferior):	5.0 cm
Pilas:	5.0cm
Estribos:	7.5 cm
Cabezal:	5.0 cm
Trabe presforzada:	4.0 cm
Losa de superestructura:	4.0 cm
Losa de acceso y guarnición:	4.0 cm
Banqueta:	2.5 cm

TRABE AASHTO VI

Propiedades de la Sección Simple



bi	=	10.0	cm
bw	=	71.0	cm
ba	=	25.5	cm
bb	=	34.0	cm
bf	=	107.0	cm
tw	=	20.0	cm
ha	=	20.0	cm
hb	=	25.0	cm
hc	=	108.0	cm
hd	=	10.0	cm
he	=	7.0	cm
hf	=	13.0	cm
ht	=	183.0	cm

f _c losa	=	250.0	kg/cm ²
f _c trabe	=	500.0	kg/cm ²
f _y ar	=	4200.0	kg/cm ²
E _t	=	185.0	cm
E _l	=	20.0	cm
β ₁	=	0.69	

Figura 16 Trabe que contiene la mayor resistencia de concreto

Esfuerzos máximos permisibles en el concreto

El tensado se deberá realizar cuando el concreto haya alcanzado un resistencia de al menos un 80% $f'c$.

$$f'ci = 0.80 f'ctrabe = 400.00 \text{ kg/cm}^2$$

Los esfuerzos en el concreto no serán mayores de lo que se indica en la siguiente tabla.

	Compresión	Tensión
Transferencia (En el extremo)	$0.60 f'ci = 240 \text{ kg/cm}^2$	$-1.6\sqrt{f'ci} = -32.00 \text{ kg/cm}^2$
Servicio (En el centro)	$0.45 f'ctrabe = 225 \text{ kg/cm}^2$	$-1.6\sqrt{f'ctrabe} = -35.8 \text{ kg/cm}^2$

En este proyecto, las traveses son las que poseen un concreto de mayor resistencia $f'c$: 500 kg/cm², siendo este el más ideal en resultados para compresión y tensión.

10 Conclusiones

Los Concretos de Alta Resistencia poseen cualidades mecánicas con un óptimo diseño de mezcla, que incluye además de los materiales comunes de concretos convencionales (Cemento, arena, grava y agua), las adiciones minerales como material cementante suplementario, superplastificantes, modificadores de viscosidad y, últimamente, agregados reciclados. Estos acompañados de un mejor curado, una relación de agua/ material cementante baja, de mano de obra más calificada y de exactitudes en las proporciones de los componentes de la mezcla. La relación de agua/material cementante bajo se da gracias al uso de aditivos como los superplastificantes o reductores de agua de alto rango, además de la utilización de materiales cementantes suplementarios que reemplazan un porcentaje de la pasta de cemento por un material más fino.

Como se muestra en el presente trabajo, en el caso de aplicación del paso superior vehicular se logró observar que la mayor resistencia utilizada de concreto para las traveses fue de un $f'c = 500 \text{ kg/cm}^2$, ya que dichos elementos son de grandes dimensiones, encargándose así, de transmitir las cargas a la cimentación. Cabe mencionar que estas traveses están expuestas a la intemperie (agua, viento, sol, etc.), cargas vivas y muertas, es por ello la importancia de utilizar concretos de alta resistencia. Para el tensado de las traveses se debe alcanzar una resistencia de al menos el 80% de la resistencia manejada, los esfuerzos en el concreto a compresión en el extremo de 240 kg/cm² y en el centro de 225 kg/cm², lo que significa que posee una buena capacidad para soportar una carga por unidad de área. Los esfuerzos por tensión para el extremo son de -32 kg/cm² y en el centro de -35.8 kg/cm², lo que significa que disminuye la probabilidad de que el concreto presente agrietamiento bajo las diversas condiciones de carga o condiciones ambientales críticas.

No se podrían alcanzar estos resultados a compresión y tensión en concretos convencionales con resistencias menores a los 400 kg/cm², aunque no hay una metodología exacta para la dosificación de mezclas de concretos de alto rendimiento, si podemos estudiar los materiales que benefician

las propiedades de dichos concretos y realizar pruebas que nos ayuden a definir las altas resistencias que si podemos alcanzar. Se conoce que el concreto se caracteriza por tener una excelente resistencia a la compresión, pero baja capacidad a la tensión, para nivelar esta deficiencia se ha recurrido a utilizar rigurosos cálculos de acero que compensen esta deficiencia, es por ello, que al tener mejores resistencias en los concretos se reduce el porcentaje de probabilidad de que un diseño de acero fracase.

México es un país de zonas sísmicas que están localizadas al sur y suroeste de la República, abarca los estados de Colima, Michoacán, Guerrero, Morelos, Oaxaca, sur de Veracruz, Chiapas, Jalisco, Puebla, Ciudad de México y las zonas peninsulares, lo que nos podría animar a optar por este tipo de concretos, por lo que, si se quisiera aplicar resistencias mayores a 550 kg/cm² se requiere proporcionar la mayor cantidad de área de acero en un diseño, para evitar generar fallas de mayor consideración. Es necesario tomar en cuenta las condiciones topográficas, sísmicas y ambientales de la zona donde se vaya a ubicar el proyecto de construcción.

Referente al costo de estos concretos, los incrementos constantes en los precios de los materiales comienzan a ser un factor decisivo en función de la obra, y resistencias que deseamos obtener, así como, ubicación de la obra, bancos de materiales, insumos, mano de obra especializada y maquinaria. Finalmente, el concreto de alta resistencia es una opción para obras de construcción que están sometidas a esfuerzos significativos teniendo un mejor desempeño en la permeabilidad y durabilidad extendida a comparación de otros tipos de concretos.

11 Bibliografía

- Norma de Calidad NMX-C-144-ONNCCE-1999-2015 "Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Requisitos para el Aparato Usado en la Determinación de la Fluidez de Morteros"
- Revista enfoque 2021, "Tras las huellas de Toni, el suizo", Guillermo Romero Salamanca.
- Los puentes de México 1985 -2014, Secretaria de Comunicaciones y Transportes 2014.
- NOM-012-SCT-2-2017 "Pesos y dimensiones sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal"
- High performance concrete. American Concrete Institute. Compilación 32. Estados Unidos 1995.
- High-performance construction materials and system, Civil Engineering Research Foundation, Abril 1993.
- Van Oss, H. (2005). Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data. US Department of the Interior. US Geological Survey. Available at pubs. usgs. gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf
- Manifestación de Impacto Ambiental, Capítulo I, "El puente paralelo al puente Dr. Ignacio Chávez de la carretera Iázaró Cárdenas - Puente Dr. Ignacio Chávez en el Estado de Michoacán", SCT.
- "Tecnología del concreto de alto desempeño", Pablo Portugal Barriga, 2007.
- "Tecnología del concreto y el mortero" Capítulo 11 "Diseño de mezclas de concreto", Diego Sánchez de Guzmán 2011.
- Committee, A. C. I. (1991). 211. ACI 211.1, Standard Practice for Selecting, Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concrete.
- ASTM C33. (2004). Standard Specification for Concrete Aggregates.
- Quiroga, P. N., & Fowler, D. W. (2004). Guidelines for proportioning optimized, concrete mixtures with high microfines. International Center for Aggregates Research Report, 104-2.
- Racky, P. (2004, September). Cost-effectiveness and sustainability of UHPC, In Proceeding from International Symposium on Ultra High-Performance Concrete (UHPC), Kassel (pp. 797-806).
- Thomas, M., Green, B., O'Neal, E., Perry, V., Hayman, S., & Hossack, (2012). Marine performance of UHPC at Treat Island. In Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials (pp. 365-370).

- “Concreto de Alto Desempeño en Colombia”, Universidad Nacional de Colombia, Marta Luz Salcedo Barrera, 2006.
- Reda, M. M., Shrive, N. G., & Gillott, J. E. (1999). Microstructural investigation, of innovative UHPC. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 323-329.
- ACI Committee, American Concrete Institute, & International Organization for Standardization. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- Norma de Calidad NMX-C-021-ONNCCE-1999-2015 “Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Requisitos para el Aparato Usado en la Determinación de la Fluidez de Morteros”
- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Yiğiter, H., Aydın, S., & Türkel, S. (2010), Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 639-648.
- Collepardi, S., Coppola, L., Troli, R., & Collepardi, M. (1997). Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *ACI Special Publications*, 173, 1-22.
- Aydın, S., Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., & Yiğiter, H. (2010). Effect of aggregate type on mechanical properties of reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*, 107(5).
- Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., & Pu, X. (2012). Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 538-544.
- Wu, K. R., Chen, B., Yao, W., & Zhang, D. (2001). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1421-1425.
- Russell, H. G., & Graybeal, B. A. (2013). Ultra-high-performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community (No. FHWA-HRT-13-060).
- Wille, K., & Boisvert-Cotulio, C. (2015). Material efficiency in the design of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 86, 33- 43.
- Diseño de Hormigones Dirigido a la Aplicación, Capítulo 2 Estado del Conocimiento, Garcia Perez J. 2004
- XIX reunión nacional de ingeniería de vías terrestres “movilidad, factor detonante para el progreso de México” planeación y construcción del puente baluarte. Ing. Salvador Sanchez Nuñez, Director de Proyecto, *Tradeco*, infraestructura