INTRODUCCION

En la actualidad uno de los principales problemas que prevalece en la industria del hormigón es la prioridad de infraestructura debido a la rápida urbanización del mundo, siempre tomando en cuenta la durabilidad del hormigón que va de la mano con el costo y las soluciones ecológicas.

Dentro de esta urbanización global, un papel primordial lo ocupan las obras de infraestructura vial, siendo de imperiosa necesidad para el desarrollo de las ciudades y países. Entre las obras viales de mayor importancia se tienen los túneles, que permiten optimizar el espacio constructivo y el desarrollo vial. Como se mencionó en el primer párrafo de esta introducción, los principales aspectos que deben de ser tomados en cuenta en la construcción son:

• La velocidad de la construcción.
• La durabilidad del hormigón.
• Aspectos relacionados con la preservación del medio ambiente.

La efectividad de los costos en la construcción de las estructuras, los materiales utilizados para la elaboración de los hormigones serían de manera prudente analizarlos. Siempre existen ocasiones en las que el concreto no

tiende a comportarse de la manera que se espera y esto afecta a la imagen de este.

La elaboración de hormigones de altas prestaciones utilizados en túneles, permite conocer las nuevas tecnologías que son puestas en marcha en la construcción, que desean solucionar los problemas comunes que ocurren durante el proceso de fundición y posterior a este, en la construcción de un túnel.

El enfoque de este proyecto radica en poner a muestra tres tipos de hormigones de nueva tecnología para túneles, que permitan minimizar problemas y a su vez; algo muy importante en la industria de la construcción que es el ahorrar la mayor cantidad de tiempo en el proceso constructivo; sin dejar de un lado la durabilidad de estos hormigones.

CAPITULO 1

1. HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

Para mejorar el desempeño del hormigón se han desarrollado nuevas y numerosas tecnologías y productos. Entre estos últimos avances el más notable es el desarrollo de las mezclas de hormigones de altas prestaciones, los que tendrán un efecto muy importante en la producción y utilización del hormigón en el futuro. En los últimos años se ha notado el desarrollo y la utilización de una creciente variedad de productos de hormigones de alto desempeño tales como el hormigón de alta resistencia, el hormigón de alta durabilidad, los hormigones de alto contenido de cenizas volantes y alto contenido de escoria, el hormigón auto-compactante, el hormigón anti-washout (no lavable) para utilizar bajo el agua, y el hormigón de contracción compensada.

Un hormigón puede ser considerado de alto desempeño, cuando dos características de estos van de la mano; estas son buenas o altas resistencias unidas con la alta durabilidad que adquieren con el tiempo. Cabe resaltar que muchas veces los resultados en laboratorio de estos hormigones no son coincidentes con los que se tiene en obra; es decir, se puede tener un hormigón de alta resistencia, pero no necesariamente acompañado de alta durabilidad. Documentos existentes informan de deterioros tempranos de estructuras, a lo que se atribuye que las condiciones de elaboración del hormigón son diferentes en campo que en obra; es decir, las reales. [1]

1.1 DEFINICIÓN

El American Concrete Institute (ACI), define el hormigón de Altas Prestaciones (HAP) como: “Un Hormigón que cumple con la combinación de desempeño especial y requisitos de uniformidad, que no puede ser rutinariamente conseguida, usando solamente los componentes convencionales y las practicas normales de mezclas, colocación y curado”

Un Hormigón de Altas Prestaciones es un conjunto de características especiales las cuales son: alta trabajabilidad, alta resistencia, alta estabilidad dimensional y alta durabilidad. Por lo mismo no se debe de

confundir, como es común, un Hormigón de Alta Resistencia con un Hormigón de Altas Prestaciones porque este último encierra mucho más propiedades que alta resistencia. Estos hormigones comenzaron a utilizarse para exteriores y enfrentaron los medio ambientes más severos, tal es el caso de las plataformas a mar abierto, puentes, carreteras, etc.

Las relaciones agua / cemento de 0.30 a 0.40, son las más comunes que se usan en los Hormigones de Altas Prestaciones. El material cementíceo debe ser de mejor calidad y con adiciones minerales. La utilización de estos componentes minerales tales como escoria, ceniza volante o puzolana resultan en un mejor control de la reología, del desarrollo del calor y de alta resistencia al ataque de los sulfatos y de la reacción álcali agregado (RAA). Sin dejar de lado el uso de aditivos de nueva generación, súper-plastificantes e hiper-plastificantes, con otras propiedades adicionales que mejoran las características de estos hormigones. [2]

A continuación se hace una breve descripción de los materiales utilizados en la elaboración de mezclas de Hormigones de Altas Prestaciones [3]:

Cemento

El uso de cemento Portland en el diseño de Hormigones de Altas Prestaciones es importante como material constituyente es por eso que se le debe brindar a sus características y propiedades, el respectivo cuidado antes y después de haberse usado como material de estructuras. Es muy importante que el cemento empleado tenga una elevada resistencia y uniformidad.

La cantidad de cemento por m^3 que se utilizará en la mezcla es determinada mediante patrones de prueba de diversos diseños. El contenido de cemento está comprendido entre los 400 y 550 Kg./ m^3 sin embargo es posible que se usen contenidos mayores en casos especiales.

Aditivos químicos

La utilización de aditivos químicos en los HAP, es de suma importancia, debido a que estos ayudan a alcanzar propiedades y requerimientos especiales, dependiendo del tipo de Hormigón que se desee diseñar.

Entre los aditivos más usados en los diseños de los HAP se tiene:

Incorporadores de aire

Cuando se utilizan agentes incorporadores de aire; se ve mermada la resistencia de la mezcla que se puede reducir de un 5 a un 7% por cada 1% de aire intencionalmente incorporado en el hormigón. Esto ocurre debido a que la relación gel – espacio disminuye y crea burbujas microscópicas que liberan la tensión capilar producida por el agua.

Por su característica de disminuir la resistencia se lo ha utilizado sólo donde se necesita una durabilidad mejorada, como por ejemplo en hormigones que estarán sujetos a ciclos de congelación y deshielo.

Superplastificantes

Los aditivos reductores de agua de alto rango, superplastificantes, o superfluidificantes son aditivos sin los cuales no se hubieran desarrollado los HAP hasta los niveles actuales.

El superplastificante es muy efectivo en la defloculación y dispersión de las partículas de cemento, son aditivos altamente eficientes cuando se utilizan adecuadamente, de los cual se puede:

1) Aumentar la trabajabilidad del hormigón sin adición de agua, 2) Dispersar las partículas del cemento, disminuyendo agua efectiva de la necesaria para una completa hidratación de la pasta.

3) Hacer hormigones tan densos que pueden ser más resistentes y durables.

Adiciones

El uso de adiciones en los HAP, está tomando más aceptación en la actualidad, ya que éstas ayudan a mejorar las propiedades físicas y químicas del hormigón, haciéndolo por consiguiente más durable y resistente.

Como ejemplo se puede citar: Fibras de acero, Micro-sílice, polímeros; en fin existen diversos tipos de adiciones que se utilizan en los HAP, con mayor frecuencia.

1.2 CARACTERÍSTICAS.

A continuación serán descritas las características más importantes de los Hormigones de Altas Prestaciones [4]:

Manejabilidad

Esta propiedad de hormigón permite una mayor facilidad de colocación y compactación sin segregación, disminuyendo así el tiempo de puesta del hormigón en obra.

Baja Porosidad

Aire introducido durante la dosificación en cantidad variable ocurre siempre; los hormigones de altas prestaciones evitan el aumento del grado de porosidad.

Rápido Desarrollo de las resistencias

Al hablar de Hormigones de Altas Prestaciones se involucra el tema de desarrollo de temprano de resistencias, a diferencia del hormigón convencional los HAP llegan a alcanzar resistencias requeridas a corto plazo, permitiendo acortar los tiempos de trabajo en obra.

Excelente Durabilidad

En la actualidad no solo se busca la eficiencia en resistencia, del hormigón, sino que se da un papel primordial a la durabilidad de un hormigón tal como es con la resistencia. El mercado actual exige que las obras cumplan con estándares de calidad, y esto indudablemente implica excelencia en la durabilidad.

Elevada Resistencia a los ataques químicos y a la abrasión

Los Hormigones de Altas Prestaciones deben de ser capaces de resistir los ataques producidos por agentes químicos externos, que puedan ocasionar daños en su forma, estructura y propiedades. En el caso específico de los túneles se debe evitar la erosión a la que están sujetos por la acción de materiales abrasivos llevados por el viento o en algunos casos por corrientes de agua.

Estabilidad Volumétrica

El concreto común utilizado en las construcciones civiles, experimenta cambios volumétricos leves, pero que pueden afectar la estructura de manera considerable. Estos cambios responden a variación de clima, humedad y factores químicos y físicos externos, en el caso de los HAP se evita o se disminuye estos cambios en lo posible.

Módulos Elásticos Elevados

El comportamiento de una estructura bajo carga depende en gran medida de la relación esfuerzo-deformación del material del que se compone y del tipo de esfuerzos al que el material está sometido en la estructura. Los HAP tienen la característica de desarrollar la deformación elástica obteniendo así módulos de elasticidad elevados.

1.3 TIPOS DE HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

Entre los Hormigones de Altas Prestaciones se tienen:

Hormigón de Alta Resistencia (HAR)

Son aquellos que tienen una resistencia a la compresión mayor a los 35 MPa son usados en estructuras en las cuales los requerimientos estructurales superan las resistencias de los concretos convencionales. Además de los ahorros en el costo de los materiales, los HAR permiten ahorros adicionales debido a la mayor velocidad en la construcción en comparación con las estructuras metálicas.

Los HAR tienen por lo general relaciones agua/cemento menores a 0.40 ayudados por el uso de superplastificantes y adiciones, tales como humos de sílice, escoria de alto horno granulada molida y ceniza volante. Debido a la baja relación agua/cemento el producto presenta no solo alta resistencia sino que también una muy alta impermeabilidad, esta es la clave para la durabilidad a largo plazo en medio ambientes agresivos. [2]

Hormigón Compactado con Rodillo (HCR)

Se define como una mezcla homogénea de áridos, aglomerantes agua y aditivos, cuya características más importantes son tener una consistencia seca. También requieren una compactación externa energética, lo que permite utilizar maquinaria de movimiento de tierra.

El que sea seco es para que pueda soportar el peso del equipo vibratorio, pero siempre con una humedad mínima para permitir la distribución de la pasta aglomerante durante la mezcla y vibración.

La resistencia a la compresión de este tipo de hormigón es mayor que la del convencional, debido a su baja relación agua cemento.

Los cambios volumétricos del HCR son significativamente pequeños, porque contiene un bajo contenido de agua de mezclado.

Hormigones con polímeros

Los polímeros son cadenas de monómeros, que según su estructura química cuenta con diferentes propiedades y particularidades. Estos elementos tienen alto peso molecular. También es de particular importancia tomar en consideración que los polímeros tienen bajo Módulo de Elasticidad y flujo plástico alto; además de no resistir factores agresivos tales como sol y agentes químicos.

Un hormigón con polímero tiene una resistencia a tracción compresión e impacto mayores, los módulos de elasticidad más altos u menor flujo plástico y contracción por secado. Tiene mayor resistencia a los ciclos de congelamiento y deshielo, y al ataque químico, esto se debe a que la porosidad y permeabilidad de estos hormigones son más bajas.

Generalmente se usa en reparaciones rápidas, en la fabricación de muros precolados reforzados con fibra, en bloques, etc.

Tiene mayor durabilidad y adhesión que los hormigones comunes. Tienen resistencias alta a la a la abrasión y al impacto. El flujo plástico es mayor que en el hormigón común. Se usa para cubiertas para puentes, tableros, reparaciones.

CAPITULO 2

2. HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES UTILIZADOS EN TUNELES

2.1 HORMIGON PROYECTADO

El hormigón proyectado también llamado hormigón gunitado es el que se coloca mediante proyección del mismo contra la superficie de roca que se desea proteger, de manera que quede adherido a esta. El hormigón proyectado se diferencia del hormigón colocado (encofrado y vibrado), a parte del método puesto en obra, en que el tamaño máximo del agregado grueso es menor y que tiene siempre como aditivo, un acelerante para facilitar su adherencia a la superficie de roca y para conseguir altas resistencias iniciales.

Dependiendo del tipo de método de puesto en obra, existen dos tipos de hormigón proyectado: el proyectado por vía seca y por vía

húmeda. En el hormigón por vía seca se proyecta separadamente el agua y la mezcla de agregados y cemento, lográndose su unión precisamente en el impacto contra la superficie que se está gunitando. En cambio, en el hormigón por vía húmeda se efectúa la mezcla completa (cemento más áridos más agua más aditivos) como en el hormigón convencional y se proyecta posteriormente la mezcla obtenida. [5]

2.1.1 HORMIGON PROYECTADO CON FIBRAS DE ACERO

2.1.1.1 DEFINICION

Es el hormigón proyectado al cual se le añade fibras de acero como adición, y que se lo hace para obtener la propiedad de ser dúctil, esto ayuda a que se de una mejor resistencia a la tracción como hormigón en masa [6].

2.1.1.2 MATERIALES

Fibras de acero

Las fibras de acero incorporadas al hormigón proyectado mejoran la resistencia a la fisuración, su ductilidad, la absorción de energía y su resistencia al impacto.

Las fibras usadas para refuerzo del hormigón proyectado tiene la forma que se muestra en la figura 2.1. Son pequeños alambres de acero confeccionados en frío formando unas patillas que mejoran su adherencia con el hormigón. Se diseñan y fabrican en varios diámetros y longitudes, siendo el más común el de 0.5 mm de diámetro y 30 mm de longitud. La cuantía que se emplea está comprendida entre 30 y 50 kilogramos de fibra por metro cúbico de hormigón. [7]

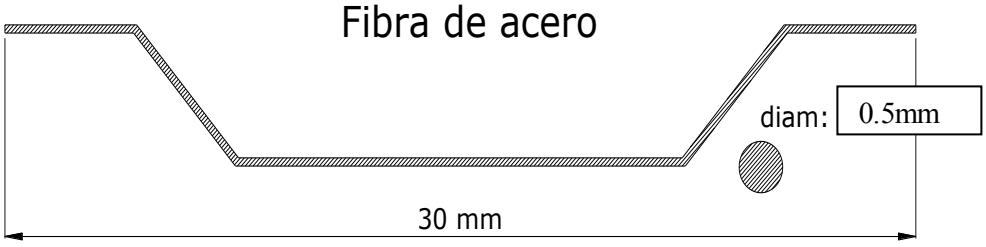


FIGURA 2.1. FIBRA DE ACERO, DIMENSIONES [7]

La superficie de dichas fibras deberá estar limpia, y no incorporará lubrificantes u otros productos que puedan impedir una buena adherencia al hormigón.

Aditivos

El aditivo principal utilizado tanto en el hormigón proyectado por vía seca como por vía húmeda es un aditivo acelerante de fraguado. El aditivo acelerante confiere al hormigón la propiedad de un fraguado inicial rápido, permitiendo de esta manera una prematura o casi instantánea adherencia a las paredes del túnel. Estos aditivos difieren mucho, en función de la clase y tipo de cemento, de la cantidad de agua añadida y de la temperatura ambiente, la dosificación de este tipo de aditivo se lo hace en base al porcentaje en peso del cemento.

En el hormigón proyectado por vía seca pueden emplearse otros aditivos como reductores del rebote. En el hormigón proyectado por vía húmeda es necesario el empleo de aditivos superplastificantes, igual que en el hormigón proyectado por vía seca se emplea reductores del rebote, facilitadores de bombeo, etc.

2.1.1.3 CARACTERISTICAS

El aspecto natural del hormigón proyectado, es áspero y rugoso, esto depende del tamaño máximo del árido empleado y de la

técnica de proyección. Pudiendo mejorarse la apariencia alisándose la superficie.

La granulometría de la mezcla es de un mayor contenido de agregados finos, que la de un hormigón convencional.

La colocación en capas, impide casi totalmente la formación de fisuras continuas de contracción.

Los valores de resistencia a compresión habitual están entre 200 y 450 Kg. / cm^2 (20 a 45 MPa), aunque si el caso lo amerita se pueden desarrollar resistencias de 700 Kg. / cm^2 (70 Mpa).

La propiedad más importante del hormigón proyectado es la de tener adherencia a la superficie de contacto, siempre que esta sea sólida, es decir, roca o suelo estable; y se encuentre limpia y saturada con superficie seca; si esta es rugosa mucho mejor.

Entre las principales características de un hormigón proyectado con fibras de acero se tiene:

- Superiores propiedades mecánicas; mayor resistencia a la tracción, flexión y cortante.
- Gran capacidad para soportar cargas.
- Control eficaz de los fenómenos de fisuración y retracción del hormigón, debido a su apropiado volumen de capilares.
- Buena resistencia a los impactos (capacidad de absorber energía) y a la fatiga.
- Ductilidad.
- Rápida y sencilla aplicación.
- Asegura un refuerzo homogéneo y tridimensional más eficaz.
- Permite reducir el número de juntas de retracción.
- La fibra de acero es de fácil colocación al hormigón, tanto en planta como al pie de obra.
- Resistencia al fuego mayor que la de un hormigón convencional.

2.1.1.4 PUESTA EN OBRA

Existen dos métodos para puesta en obra del hormigón proyectado: por vía húmeda y vía seca, el procedimiento de cada uno se explica a continuación:

Vía seca.- la mezcla de cemento, agregados y fibras, la coloca dentro de la tolva de la gunitadora. En la boquilla de la manguera se añade el agua y los aditivos líquidos disueltos en esta, que llegan a presión por otra manguera. La mezcla de cemento, agregados y agua se produce en la boquilla de la manguera. El operario que está gunitando porta la manguera de la mezcla y gradúa manualmente la entrada de agua, en función de consistencia que aprecia en el hormigón resultante. Por este motivo el hormigón proyectado por vía seca resulta bastante sensible a la habilidad y experiencia del operario.

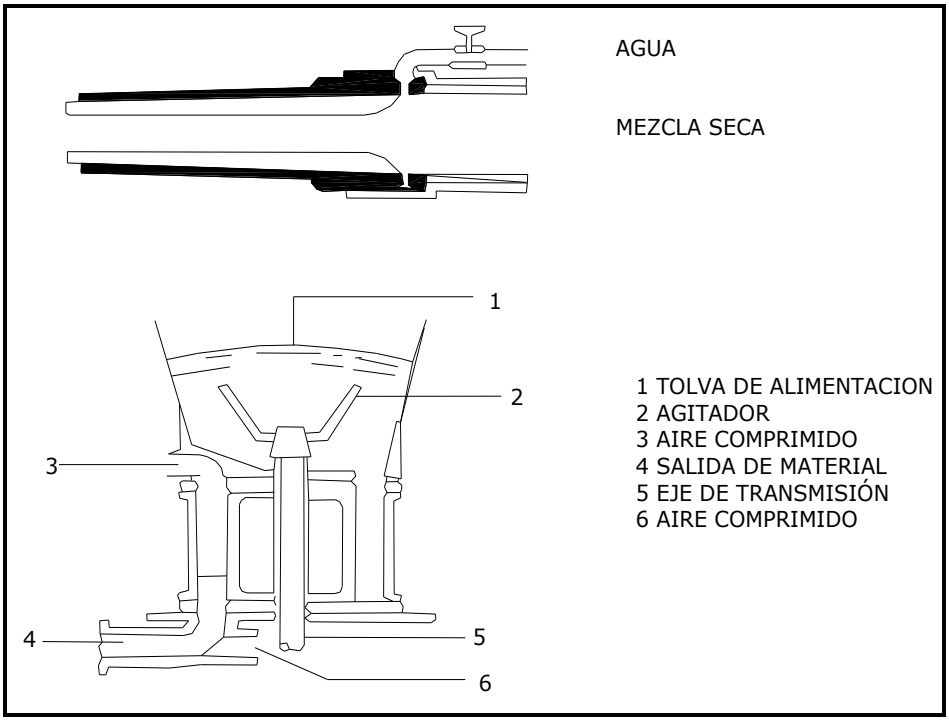


FIGURA 2.2. ESQUEMA DETALLADO DE GUNITADORA [7]

Vía húmeda.- el hormigón proyectado por vía húmeda es similar al proceso de bombeo del hormigón. La mezcla completa (cemento + agregados + agua + aditivos) se vierte sobre la tolva de la gunitadora, la mezcla es impulsada por la manguera, en cuya boca se añade aire comprimido para proyectar la mezcla también posible añadir aditivos líquidos en la boquilla de la manguera.

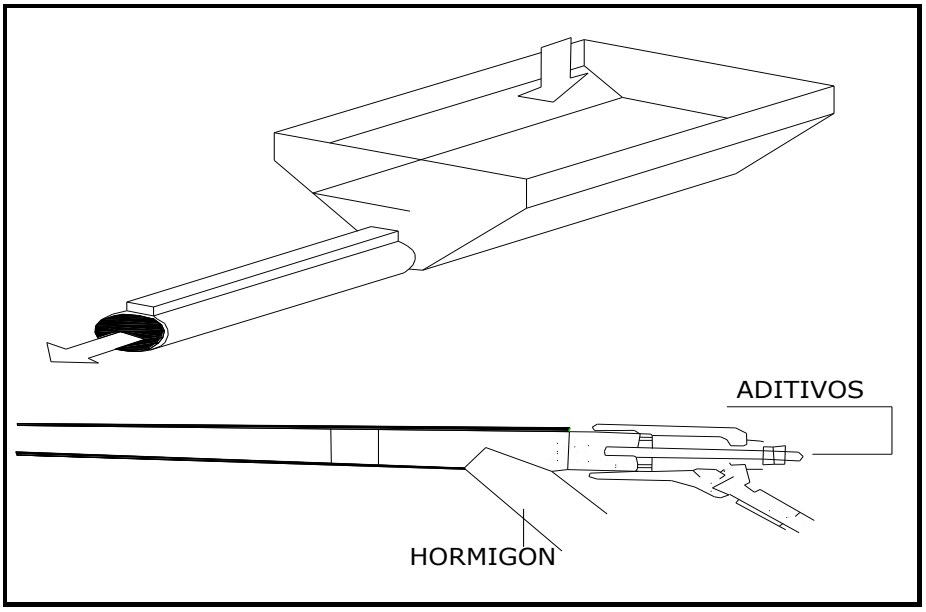


FIGURA 2.3. EQUIPO DE PROYECCION VIA HUMEDA [7]

En la siguiente tabla se muestran las principales características de ambos sistemas.

TABLA 2.1

CARCTERISTICAS DE SISTEMAS DE PROYECCION [7]

Actividad	Vía Seca	Vía Húmeda
EQUIPOS	Más Baratos. Bajo Mantenimiento, desgastes considerables	Equipos más compactos. Menores desgastes
MEZCLADO	En la obra o en la planta. Problemas con la %W de la arena	Hecha en planta. No hay problema con la %W de la arena
RENDIMIENTO	Hasta 5 m^3 hora.	Hasta 10 m^3 hora
RECHAZO	Entre un 20 y un 50%. Pérdida áridos por rechazo	Menor rechazo, hasta 10% como mínimo
CALIDAD	Mayores resistencias. Hormigón heterogéneo	Menores resistencias. Más homogéneo
VELOCIDAD DE IMPACTO	Alta, resulta una mejor adherencia	Inferior, pero suficiente
ADITIVOS	En polvo en la mezcla Líquidos en la manguera de salida	Todos en la mezcla, más fácil de usar aditivos líquidos
POLVO	Se produce más polvo	Poco polvo: mejor visibilidad y no hay laminación por polvo
FLEXIBILIDAD	Puede utilizarse para todo tipo gunitados	Puede usarse también para bombear hormigón colocado.

Las fibras pueden ser añadidas de forma manual o automática, tanto en la planta de hormigón como a pie de obra.

a) Integración de las fibras de acero en la planta:

1. Repartiendo manualmente las fibras sobre la cinta de carga de áridos a la amasadora.
2. Añadiendo directamente las fibras al interior de la amasadora.
3. Añadiendo las fibras al interior del camión hormigonera.

Este método funciona bien con todos los tipos de fibra de acero siempre que la esbeltez sea inferior o igual a 50. El tiempo extra de amasado después de la integración de las fibras es de aproximadamente 1 min. por metro cúbico de hormigón.

En todos los casos, la adición del superplastificante deberá ser siempre anterior a la integración de las fibras. Se recomienda que la adición sea en obra debido a su limitado efecto en el tiempo.

b) Integración en la obra:

1. Añadiendo las fibras manualmente al interior del camión desde una plataforma. Este procedimiento exige que la esbeltez de las fibras de acero sea inferior o igual a 50.

2. Empleando una gunitadora.

Es el procedimiento más sencillo y permite que el mezclado en la hormigonera sea en la matriz del hormigón. Se emplea con fibras de acero de esbeltez superior a 50.

- Añadir las fibras al interior de la hormigonera a una velocidad máxima de 50 kg. por minuto y mientras el tambor del camión gira a la velocidad máxima de rotación.
- El camión no deberá de estar cargado más de un 85% de su capacidad.
- Una vez terminado el proceso de integración continuar amasando durante aprox. 1 min. por m3 de hormigón.
- Realizar una inspección visual para observar si la fibra se ha repartido uniformemente y si no fuera así seguir amasando a velocidad máxima de rotación hasta que se consiga la correcta distribución.

Rebote en la Proyección

El rebote de proyección está formado por los componentes que no se adhieren durante el proceso de proyección del hormigón, y que salen rebotados fuera del lugar adecuado. La proporción de

rebote es mayor inicialmente debido a que el chorro de la mezcla rebota directamente en el soporte, antes que se forme una capa de hormigón que amortigüe el gunitado, y también cuando está dirigido a las armaduras. De ahí que las proyecciones con un espesor mayor de capa tienen un menor porcentaje de rebote que los de menor espesor de capa donde el rebote es mayor.

El porcentaje de rebote en todos los casos dependerá de la relación agua / cemento, del tipo de granulometría de los agregados, de la cantidad de agregado grueso presente en la mezcla de hormigón, de la presión de agua (vía seca), de la velocidad de proyección (caudal de aire), del ángulo de proyección, de la distancia de proyección, del diseño del robot y, sobre todo, de la habilidad y experiencia del gunitador. Basado en experiencias, se pueden establecer los siguientes parámetros comparativos de porcentajes de rebote en los diferentes sistemas de proyección:

• Vía seca: 30 - 35%

• Vía húmeda: 8 - 12%

2.1.2 HORMIGON PROYECTADO CON MICROSILICE

2.1.2.1 DEFINICION

Un hormigón proyectado con microsílice, es aquel que contiene finas partículas de humo de sílice (Si O2), mejorando considerablemente la adherencia del hormigón proyectado, disminuye su rebote, mejora la trabajabilidad y la impermeabilidad, y aumenta las resistencias iniciales y finales.

2.1.2.2 MATERIALES

Microsílice

El humo de sílice o microsílice es un producto secundario que resulta de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en calderos de arco eléctrico en la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio. El humo de sílice consiste de partículas vidriosas muy finas con una superficie específica del orden de los 20.000 m^2 / Kg.

2.1.2.3 CARACTERISTICAS

El microsílice (o humo de sílice), por causa de su extrema finura y su alto contenido de sílice, cumple un papel muy

importante en la estructura de la pasta de cemento. Actúa como relleno físico, aumentando la compacidad de la mezcla.

Reduce considerablemente la exudación en el hormigón fresco debido a su gran superficie específica y capacidad para retener agua.

Los contenidos normales de humo de sílice varían entre 5 y 15 % del peso del cemento.

Además el uso de este material confiere al hormigón una reducción a la corrosión de la armadura. Sin dejar de lado que le proporciona una mejor resistencia a la abrasión.

Combinado con el efecto de aditivos superfluidificantes, permite obtener hormigones con muy bajas relaciones agua/cemento y por consiguiente elevadas resistencias a compresión. [8]

2.1.2.4 PUESTA EN OBRA

La microsílice se adiciona junto con el cemento y antes de la adición del agua de amasado. Se recomienda un amasado en seco para una mejor homogeneización.

Debido a la gran superficie específica del producto, deben asegurarse los tiempos de mezclado suficientes, de forma que la dispersión de las partículas sea suficiente.

La gran finura de microsílice aconseja reducir el contenido en finos de la arena y aumentar el contenido de áridos gruesos.

Deben extremarse los cuidados en la fase de curado.

- En general pueden reemplazarse 3 partes de cemento por una de microsílice, manteniendo las propiedades mecánicas.
- Pueden ganarse hasta 10 MPa de resistencia a compresión añadiendo un 5-6 % de microsílice sin alterar la dosificación.
- Para hormigones de alta resistencia se usarán dosificaciones de microsílice superiores al 7-8%.

La limpieza de equipos sucios de microsílice puede realizarse simplemente con agua.

La reducción del rebote es una consideración muy importante a tener en cuenta en una obra, se recomienda utilizar aditivos especiales reductores del rebote.

2.2 HORMIGÓN DE BAJA RETRACCIÓN DE USO DE TÚNELES

A lo largo de la vida de servicio del hormigón, cualquier cambio de índole físico en la superficie del sólido produce deformaciones en la matriz del cemento que deben ser tomadas en cuenta por su importancia en la durabilidad y desempeño del hormigón. Frecuentemente la práctica moderna en la construcción con hormigón no presta la debida atención a las dos causas principales de la fisuración del concreto, esto es debido a la retracción térmica y retracción por secado. Y si sumamos a esto el diseño de las mezclas actuales que incluyen altos contenido de cemento Pórtland común y de alta resistencia inicial, que incrementan la sensibilidad a estos fenómenos.

La importancia de saber controlar la retracción por secado del hormigón es sin duda mucho mejor analizada en la práctica. La retracción de este tipo afecta de manera especial al desempeño de la estructura de concreto; sin dejar a un lado a la durabilidad del material y los efectos agresivos sobre la estructura. Una forma de minimizar la fisuración por contracción es compensar la retracción utilizando cementos expansivos o puros, es decir, con bajo contenido de puzolana. De manera similar podemos compensar la

retracción del concreto con la inclusión de aditivos, como lo son los incorporadores de aire de hormigón.

Para el proyecto de tesis lo que se ha querido lograr es controlar la retracción del hormigón de revestimiento de túneles, con el fin de evitar el agrietamiento del concreto. [9]

2.2.1 DEFINICIÓN

Es un Hormigón de Alta Prestación capaz de reducir la retracción, de tal forma que sus deformaciones sean mínimas (por debajo de los parámetros requeridos por las normas); y al mismo tiempo eviten que el concreto sufra cambios volumétricos en su estructura disminuyendo el riego de fisuraciones.

Durante las primeras etapas los cambios volumétricos son acomodados por flujo plástico, pero al continuar la hidratación, el hormigón adquiere las propiedades implícitas de un sólido y responde a sus cambios de volumen por dicha propiedad. Los primeros días el concreto aunque este en

estado de sólido rígido, tiene comparativamente baja resistencia, especialmente a la tracción y por lo tanto es susceptible a agrietarse.

En estado sólido el hormigón, experimenta cambios de volumen definidos por incrementos o decrementos causados por dilataciones y contracciones, debidos a ciclos de temperatura y humedad. Si el concreto se expone a la acción del aire la mayor parte del agua evaporable de la mezcla se libera esto depende de la velocidad y secado, de la temperatura y condiciones de humedad del ambiente. Al secarse el concreto, su volumen se reduce, probablemente por efecto de la tensión capilar que se produce en el agua que queda en el hormigón. Y ocurre lo contrario, cuando el hormigón su proceso de endurecimiento se lo hace en agua, este se dilata y recupera gran parte de la perdida de volumen debido a la retracción anterior.

La retracción por secado del hormigón puede durar muchos meses, a un ritmo decreciente, pero esta es una propiedad perjudicial del concreto, que se debe de controlar

adecuadamente para evitar, daño permanente en la estructura de hormigón.

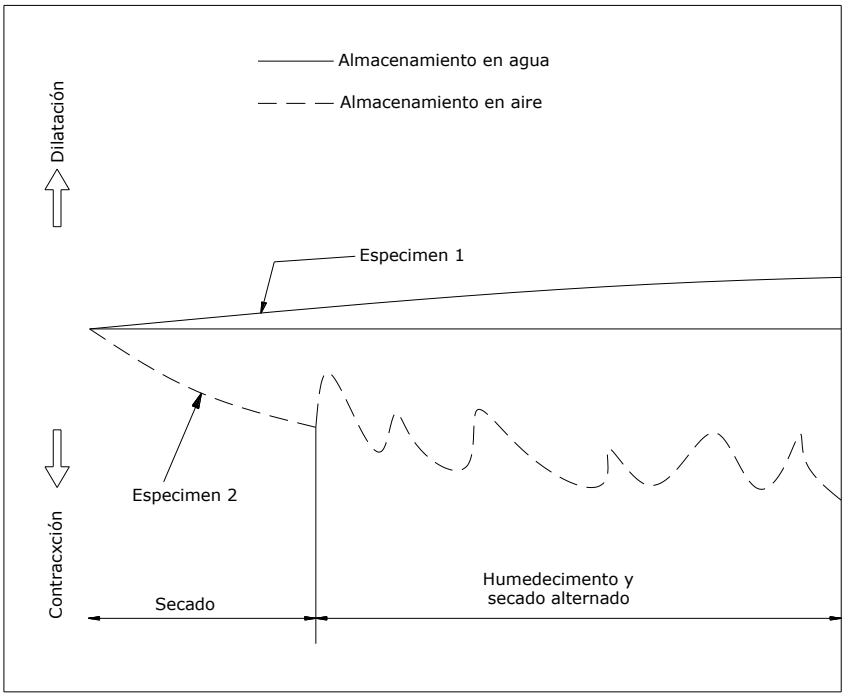


FIGURA 2.4. CONTRACCION O DILATACION DEL CONCRETO EN FUNCION DEL TIEMPO [10]

2.2.1 MATERIALES

Para este tipo de hormigón lo esencial es poder controlar las deformaciones debido a la retracción, éstas ocurren debido a factores internos y externos tales como, el calor de hidratación del cemento, la temperatura y la humedad del ambiente, los

mismos que alteran la composición del concreto. Por esta razón el ACI recomienda usar relaciones A/C bajas, en un rango de 0.30 a 0.35 ya que el mayor contenido de agua efectiva en la mezcla provoca mayor retracción del hormigón [11].

La utilización de un cemento Tipo I, es necesaria, este es un cemento puro de bajo o poco contenido de puzolana además poseer cantidades mínimas de óxido de hierro, y esto ayuda a tener menores valores de retracciones, la puzolana genera mayor calor de hidratación, aumentando la temperatura interna del concreto y en casos extremos generando fisuras por contracción.

El tema de durabilidad de este hormigón preocupa a la hora de realizar el diseño definitivo de la mezcla, el evitar las fisuras en la estructura es lo que se desea lograr para ello, se decidió el usar un aditivo inclusor de aire al hormigón, la dosificación de este aditivo se lo experimentó en el laboratorio; partiendo como base el valor de 6% de aire total. El aditivo inclusor de aire que se decidió usar es de la casa productora Sika, el nombre de este es Sika Aer.

Siguiendo con el tema de durabilidad e incluyendo la retracción del hormigón, se pensó en un aditivo que controle la retracción por secado del concreto, para esto se consultó con Sika sobre algún tipo de aditivo que tenga este tipo de propiedad, pero aquí en el Ecuador no se encuentra en el mercado un producto que tenga estas características, por medio de averiguaciones se supo que en Colombia se produce el Sika Control 40, que es un aditivo reductor de retracción para concreto, se decidió utilizar dos mezclas una sin este aditivo y otra con este. El aditivo Sika Control 40 mejora la cohesión en los poros del concreto, reduciendo la pérdida de agua y por consiguiente la retracción disminuye. Esta reducción depende del tipo de diseño de la mezcla pero se estima que es por el orden de 50%. Y no altera las resistencias finales del hormigón.

2.2.2 CARACTERISTICAS

Hoy en día al hablar de hormigones de alto desempeño se debe dar prioridad no sólo a la obtención de altas resistencias, sino también, al hecho de que las estructuras de concreto deben de poseer mayor durabilidad, evitar la fisuración producto de agentes químicos internos (reacciones químicas,

que producen retracción) y agentes externos como lo es la abrasión a la que está expuesta una estructura como un túnel.

Las características de este hormigón deberán ser las siguientes [12]:

- Capaz de desarrollar resistencia a la compresión de un hormigón común, es decir, que al colocarse aditivos este no pierda resistencia.
- Un hormigón que sus valores de deformaciones (retracciones), sean inferiores a los parámetros normales de un hormigón convencional, menores a 0.04 %. Esto ayudará a que no ocurran fisuras en el hormigón debido a la retracción.
- La inclusión de aire le da la propiedad de ser más durable o por lo tanto darle resistencia a los agentes físicos que puedan afectar su estructura molecular del concreto, y pueda ser utilizado en ambientes agresivos.
- Que pueda ser empleado para todas las estructuras donde existan requerimientos de limitación de ancho de fisuras.

2.2.3 PUESTA EN OBRA

La puesta en obra de un hormigón de baja retracción debido a su bajo relación agua / cemento, se la debe hacer con utilización de sistemas vibradores, en el caso de revestimiento para túneles, se debe utilizar el encofrado metálico con sistema de vibración de paredes de encofrado, esto ayudará al mejor colado del hormigón.

Si se requiere de más trabajabilidad del hormigón, se puede recurrir al uso de aditivo superplastificante, en una proporción recomendada no mayor de 2 % del peso del cemento. Para el uso de aditivo incorporador de aire se debe de tener en cuenta que este debe ser colocado después completarse el mezclado del hormigón inclusive con el superplastificante, debido a que la dosis aplicable del incorporador es muy baja, esto es para evitar riesgo de un mezclado deficiente y por consiguiente el aditivo no haga efecto en el hormigón.

2.3 HORMIGON AUTOCOMPACTANTE

Por mucho tiempo la compactación del hormigón ha sido un tema de gran preocupación en la Ingeniería, dada la importancia que tiene este proceso en el producto de hormigón terminado, ha llevado al estudio de nuevas tecnologías de vibración y técnicas de consolidación. Por otro lado, el desarrollo de la construcción en hormigón ha sido enorme, logrando cada vez formas más complejas y sofisticadas, por lo que los métodos de vibración convencionales han sido una limitante para la confección de estructuras complejas.

2.3.1 DEFINICION

Según el profesor Okamura [13], el hormigón autocompactante, HAC, es “el hormigón capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenando de forma natural el volumen del mismo, pasando entre las barras de armaduras y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso, sin ninguna compactación interna o externa, y sin que se produzca ninguna segregación física de sus constituyentes”

2.3.2 MATERIALES

Los componentes básicos que constituyen el hormigón autocompactante son: cemento, arena, grava, agua y aditivo superplastificante.

Los requerimientos básicos en cuanto al tipo de cemento los marcará el tipo de aplicación que tendrá el hormigón, la cantidad mínima recomendable es de 350 Kg/m^3 para satisfacer la demanda de finos y la de agua.

En las arenas empleadas es importante su distribución de tamaños, para ello es necesario emplear arenas continuas, sin cortes en su granulometría y preferiblemente sin formas lajosas (típico de las arenas silíceas), su cantidad deberá estar en consonancia con la cantidad de grava. Generalmente el contenido de arena puede representar el 60-50% de la cantidad de árido total, en función del cemento y de las características de la grava.

La alta dosificación de finos se justifica por las moderadas viscosidad y cohesión que deben existir en la pasta para evitar la segregación de los áridos y disminuir el rozamiento entre los áridos gruesos.

Las mayores exigencias en cuanto a materiales para la confección de hormigón autocompactante están en la grava. A pesar de no existir una limitación en cuanto a su naturaleza, sí existen limitaciones con el tamaño máximo y el coeficiente de forma.

El tamaño máximo del árido se limita a 25mm, aunque es preferible limitarlo a 20mm. Evidentemente, el tamaño máximo del árido deberá guardar relación con la distancia entre armaduras, pero dado el caso que fuera posible trabajar con tamaños superiores a 20-25 mm, no deberá excederse este tamaño ya que implica un elevado riesgo de bloqueo y segregación de la masa. De todas formas, los mejores resultados globales se consiguen empleando tamaños máximos entre 12-16 mm.

El aditivo superplastificante es imprescindible para la confección de hormigón autocompactante. No todos los tipos son utilizables. Los aditivos basados en sulfonatos o condensados de melamina no ofrecen suficiente poder reductor de agua y en consecuencia, los únicos tipos utilizables son los basados en éter policarboxílico modificado, capaces de reducir agua en valores superiores al 35%.

Independientemente del poder reductor de agua, las características del aditivo deben ajustarse a las características de cada aplicación (en función de si se demanda elevada resistencia inicial, prolongado mantenimiento de la consistencia, etc) y en correspondencia al tipo de cemento, adición y áridos empleados. En este aspecto, si se emplean las adiciones más adecuadas para cada aplicación el efecto del aditivo sobre el desarrollo de resistencia o sobre el fraguado no es tan acusado, especialmente en el caso de emplear cenizas, donde éstas colaboran de forma muy importante en el mantenimiento de la consistencia y dejan las particularidades del aditivo en segundo plano. Este razonamiento no es válido en los casos donde se demanda elevada resistencia inicial. Ante estas situaciones las particularidades del aditivo en el desarrollo de resistencia sí son muy trascendentes. [14]

2.3.3 CARACTERISTICAS

El hormigón autocompactante permite resolver y mejorar una serie de problemas en la ingeniería como son: compactación de hormigones con una alta densidad de armadura, mejoramiento en los tiempos de hormigonado, mayor

rendimiento en la mano de obra, el no requerimiento de equipo de vibración, el logro de mejores terminaciones, reducción de ruido ambiente y la mejora de condiciones de salud y seguridad para los trabajadores.

Las características fundamentales que deben definir un hormigón autocompactado son las que se muestran a continuación:

- Elevada fluidez: El hormigón autocompactante se caracteriza por una elevada fluidez hasta el punto que los métodos tradicionales de ensayo, como por ejemplo el cono de Abrams, resultan obsoletos.
- Elevada resistencia a la segregación: La elevada fluidez no debe implicar nunca segregación o exudación. La masa debe mantener la homogeneidad tanto de forma intrínseca como al someterse a la puesta en obra (paso a través del armado, vertidos...)
- Adecuada viscosidad plástica: El hormigón autocompactante debe fluir por la acción de su propio peso. Esto requiere unas características de formulación para que el hormigón no se bloquee en su paso a través

de las armaduras, con un perfecto relleno y que "corra" a través del encofrado, acomodándose a su forma.

- Deformabilidad en estado fresco: Para obtener unos buenos acabados y un perfecto recubrimiento de las armaduras, el hormigón autocompactante debe caracterizarse por su deformabilidad en estado fresco. [15]

Efecto de la Cantidad de Finos en las Propiedades del HAC

La adición de finos es muy importante en los hormigones autocompactantes. Los finos dan la cohesión y consistencia al hormigón para evitar la segregación y controlar la exudación. Si no se incorpora al hormigón una cantidad suficiente de finos, se debe adicionar una mayor dosis de cemento. Lo que produce un aumento en el costo del hormigón y podría traer asociado problemas de agrietamiento por retracción térmica o hidráulica.

La principal característica que afecta el desempeño de los hormigones autocompactantes es su superficie específica. Si

bien la cantidad de finos necesaria para obtener un hormigón autocompactante es distinta para cada fino en particular, existe una relación directa entre la finura del material y la cantidad que se debe adicionar: A mayor finura menor es la cantidad de árido requerido y viceversa. [16]

Influencia de la Cantidad de Aditivo en las Propiedades del HAC

La cantidad de aditivo tiene una importante influencia en las propiedades del HAC. Una sobredosificación puede causar segregación, exudación y un aumento del costo del hormigón. Por otro lado, una cantidad insuficiente de aditivo producirá una baja fluidez y una pérdida de resistencia. Las proporciones óptimas de aditivo para ser usadas con los materiales finos están entre 1.2 a 1.8 % respecto del peso del cemento. [16]

2.3.4 PUESTA EN OBRA

El hormigón autocompactante es más caro que el hormigón habitual. Los costos extra se han compensado por ahorros en las operaciones de colocación del hormigón de acabado y por incremento general de la productividad en la obra. [17]

Consideraciones importantes antes de usar HAC

Debido a la importante capacidad de flujo que tiene el HAC, es importante señalar lo siguiente:

- Se han de utilizar moldes completamente estancos en la colocación del HAC.
- Además, los moldes han de ser capaces de soportar la presión hidrostática que ejerce un fluido cuya densidad es 2,3 a 2,5 veces la densidad del agua; de lo contrario, se producirán importantes pérdidas de lechada que ocasionaran defectos en la pieza enmoldada e incluso accidentes por rotura del encofrado.

Para aplicaciones verticales, las principales ventajas que desean ver los contratistas son una reducción del tiempo de colocación del hormigón, una mayor regularidad y calidad de las superficies en contacto con los encofrados.

Utilizar hormigón autocompactante incrementa la velocidad de vertido, la reducción en los tiempos de hormigonado también puede ayudar a liberar las grúas para que estén disponibles para otras actividades y por lo tanto mejorar la productividad.

Como no es fácil proceder a la vibración uniforme del hormigón y con regularidad constante en todas las partes de la estructura, la vibración tiene un efecto muy directo sobre la calidad de las superficies. La eliminación de la vibración debería mejorar la calidad de las superficies y bordes obtenidas y reducir de una manera muy apreciable el costo de cualquier trabajo de acabado de hormigón que se pueda necesitar.

La eliminación de la vibración tiene también efectos muy positivos sobre las condiciones de trabajo y sobre las consideraciones medioambientales.

El control de calidad de este hormigón necesita:

- Mayor calificación del personal
- Mayor atención sobre la reología del hormigón

Respecto al equipamiento técnico:

- Se necesita una mezcladora efectiva
- Unos medidores de humedad precisos

CAPITULO 3

3. ENSAYOS

Para determinar las características y cualidades de los hormigones mencionados en el capitulo anterior se han realizado diferentes tipos de ensayos para cada uno de ellos, como parte preliminar de este capítulo se mostrarán las dosificaciones utilizadas para cada hormigón en estudio.

Hormigón Proyectado

El diseño de esta mezcla de hormigón tuvo que adaptarse a las consideraciones y especificaciones de los agregados y del cemento, para requerimientos de resistencias iniciales y de manejabilidad.

Para el revestimiento del túnel, el hormigón diseñado es Shotcrete H33 con una resistencia a la compresión f'c de 35 MPa.

TABLA 3.1

DOSIFICACION DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PROYECTADO

Materiales	***Mezcla 1 kg/m3***	***Mezcla 2 kg/m3***
Piedra 3/4	210	144
Piedra 3/8	500	336
Arena de Río	440	632
Arena Triturada	440	632
Cemento Tipo IP	380	440
Agua	180	158
Aire	2%	2%
Fibra de Acero	40	40
Microsílice	20	20
Densidad	2210	2402

Hormigón Baja Retracción

Para este tipo de hormigón cuyo fin tiene de disminuir las retracciones del hormigón para evitar fisuras se efectuaron diferentes tipos de mezclas

para ver el comportamiento de las deformaciones que en este se pueden producir.

TABLA 3.2

DOSIFICACION DE MEZCLAS DE HORMIGÓN DE BAJA RETRACCION

Materiales	***Mezcla T-1 kg/m3***	***Mezcla T-2 kg/m3***	***Mezcla T-3 kg/m3***	***Mezcla T-4 kg/m3***
Agua	140	175	163	163
Cemento Tipo I	350	500	480	480
Arena de Río	520	520	471	471
Arena Triturada	280	280	254	254
Piedra 1/2	500	500	450	450
Piedra 3/4	500	500	450	450
Densidad	2290	2475	2268	2268

Hormigón Autocompactante

Las dosificaciones de los distintos componentes que entran a formar parte de un H.A.C. deben ser cuidadosamente estudiadas para poder

realizar un hormigón de elevada consistencia y una cohesividad que atraviese un denso armado sin bloqueo del árido grueso y que sea compatible con la ausencia de segregación; para ello debe tener en cuenta las características particulares del material a preparar y el tipo de elemento para el cual se va a utilizar. Este hormigón ha podido ser desarrollado gracias a la introducción de los nuevos polímeros.

TABLA 3.3

DOSIFICACION DE MEZCLAS DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Materiales	***Mezcla 1 kg/m3***	***Mezcla 2 kg/m3***
Agua	250	220
Cemento Tipo IP	500	490
Arena de Río	553	586
Arena Triturada	237	251
Piedra 1/2	664	702
Densidad	2204	2210

3.1 ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DEL HORMIGON

Para la evaluación de las resistencias a la compresión de los tres tipos de hormigones en estudio, se requirió en algunos casos de lecturas progresivas para llevar una evaluación más detallada de las mezclas, con el fin de descartar mezclas con bajos valores de resistencias.

Para las pruebas de resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido, se tomaron especimenes premoldeados de muestras de concreto fresco, para lo cual se cumplió de manera correcta con las normas ASTM C39.

Las probetas utilizadas para este ensayo consisten en cilindros de concreto de 10 cm. de diámetro y 20 cm. de altura; y fueron curados y protegidos bajo condiciones ideales de humedad y temperatura (cuarto húmedo); el objeto de esto fue el de determinar la resistencia potencial de los hormigones. [18]

Los resultados que fueron obtenidos se muestran a continuación:

HORMIGÓN PROYECTADO

TABLA 3.4

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA 1

MUESTRA	*ASENT cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
1	18	1	2213	10.03
	18	7	2215	26.20
	18	28	2219	38.59

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.47
Sigunit L22	6 %
Rheobuild	1.50 %
MicroSílice	15 %
Fibra de Acero	40 Kg

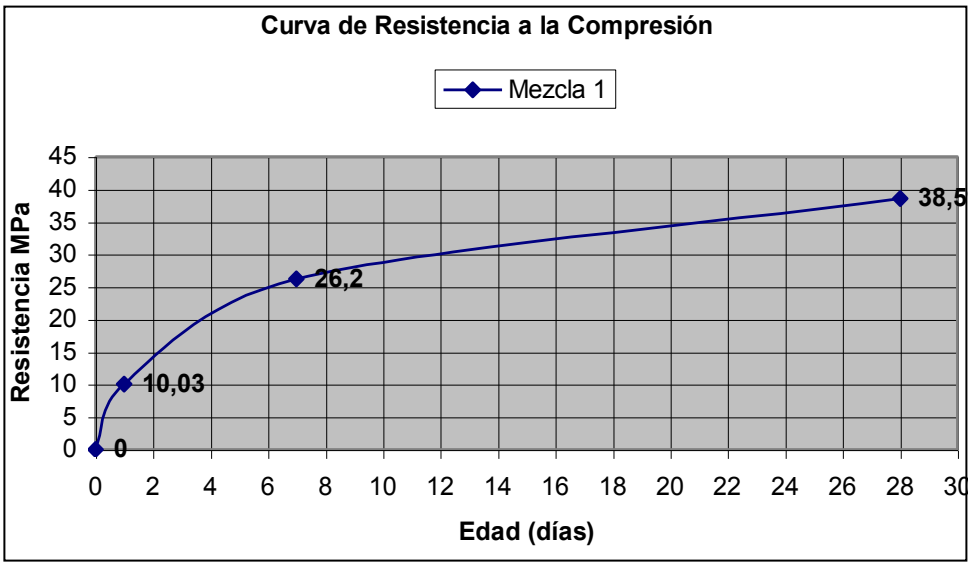


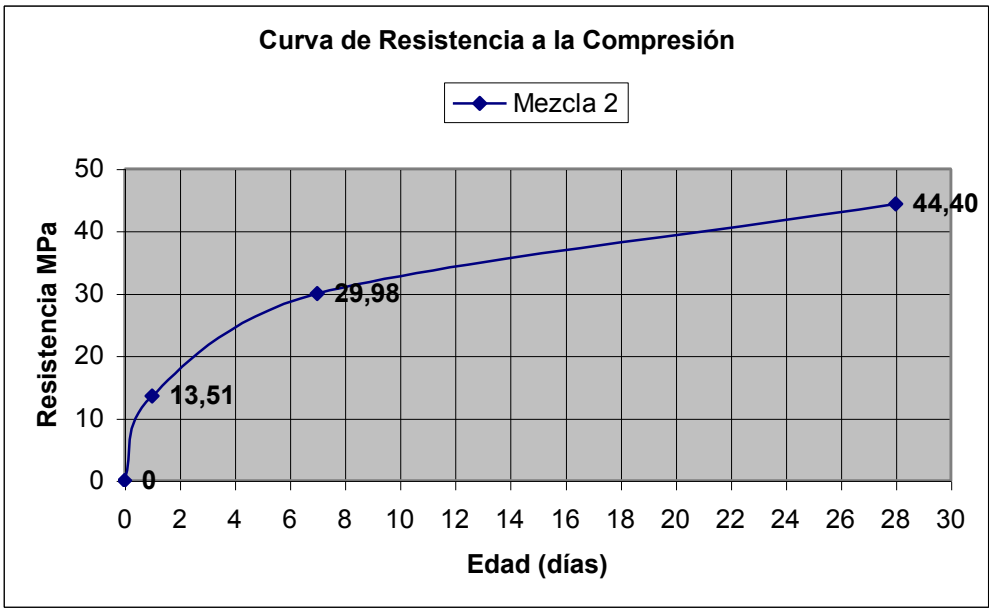
TABLA 3.5

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA 2

MUESTRA	*ASENT cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
2	16	1	2402	13.51
	16	7	2406	29.98
	16	28	2409	44.40

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.36
Sigunit L22	6 %
RheoMac	15 %
Fibra de Acero	40 Kg



HORMIGÓN DE BAJA RETRACCIÓN

TABLA 3.6

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA T-1

MUESTRA	*ASENT cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
T-1	12	3	2346	13.19
	12	7	2360	18.04
	12	28	2358	21.18

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.40
Sika Aer	0.07 %
Sikament N100	1.50 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.

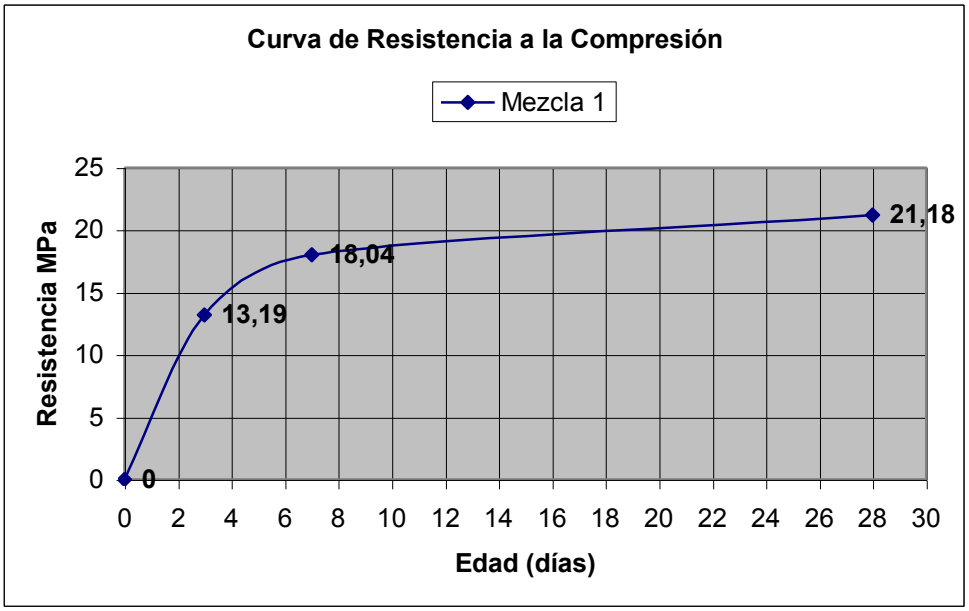


TABLA 3.7

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA T-2

MUESTRA	*ASENT cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
T-2	10	3	2403	20.72
	10	7	2410	23.99
	10	28	2398	27.12

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.35
Sika Aer	0.07 %
Sikament N100	1.50 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.

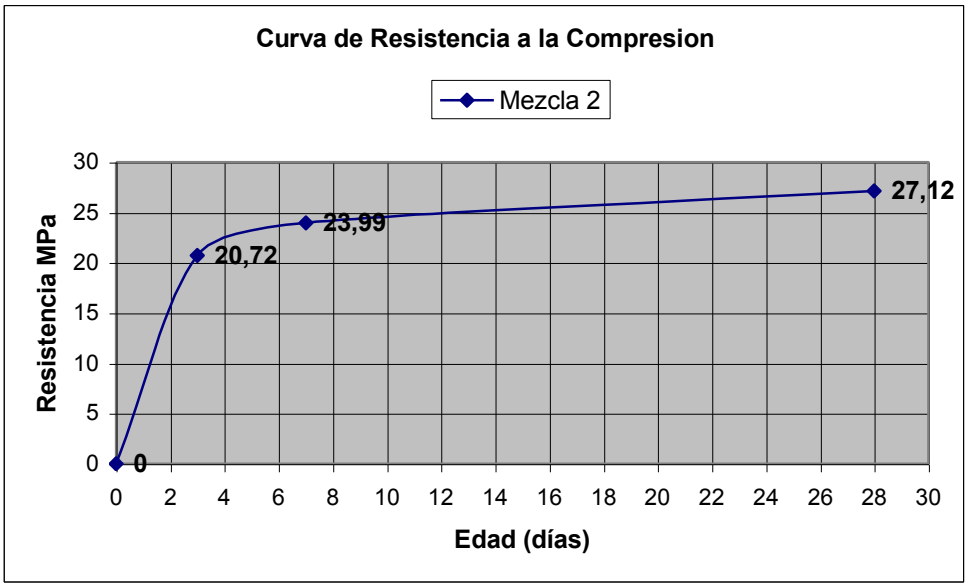


TABLA 3.8

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA T-3

MUESTRA	*ASENT cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
T-3	11	3	2413	29.97
	11	7	2418	32.45
	11	28	2405	40.59

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.34
Sika Aer	0.07 %
Sikament H200	1.50 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.

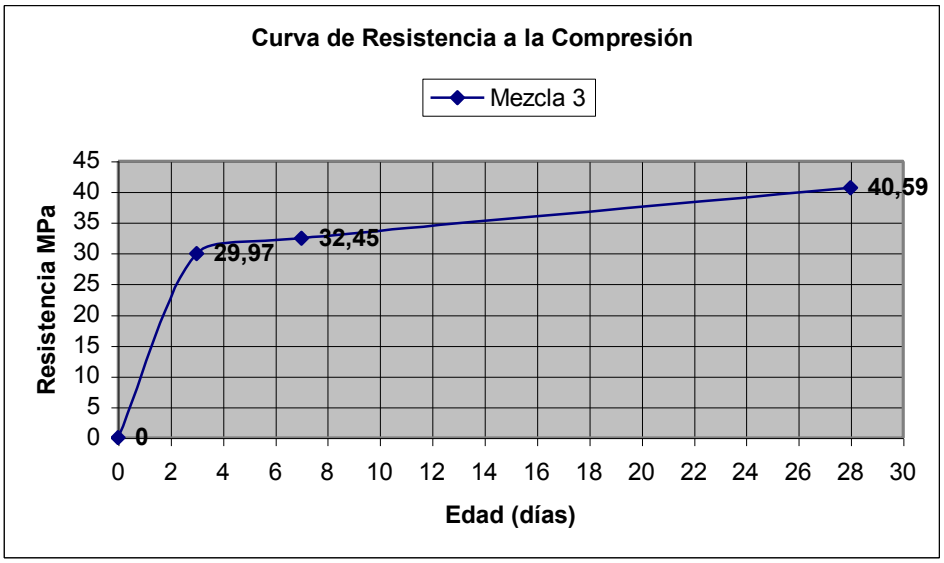


TABLA 3.9

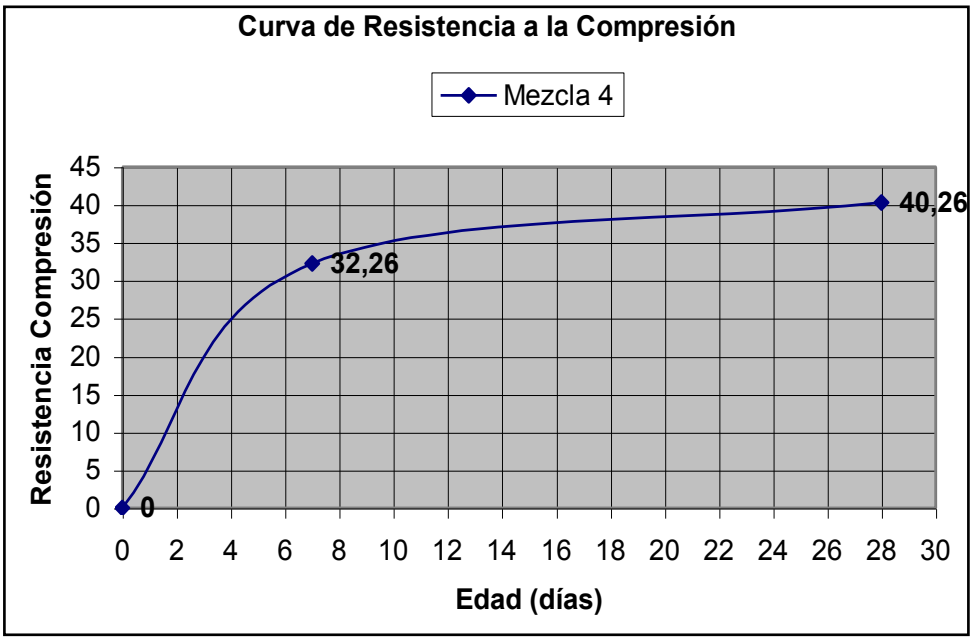
RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA T-4

MUESTRA	*ASENT cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
T-4	10	7	2410	32.26
	10	28	2401	40.26

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.34
Sika Aer	0.07 %
Sikament NH100	1.50 %
SikaControl 40	2.00 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.



HORMIGÓN AUTO COMPACTANTE

TABLA 3.10

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA 1

MUESTRA	*EXTENDIDO cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
1	65	7	2204	20.21
	65	28	2209	27.18
	65	42	2210	29.76

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C 0.50
Sika Viscocrete 5 1.2 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.

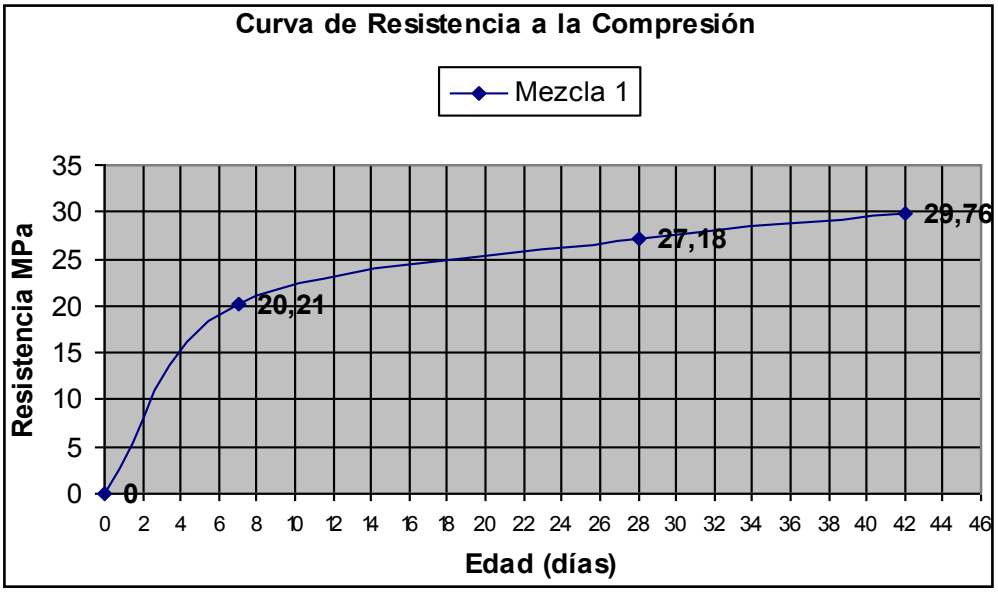


TABLA 3.11

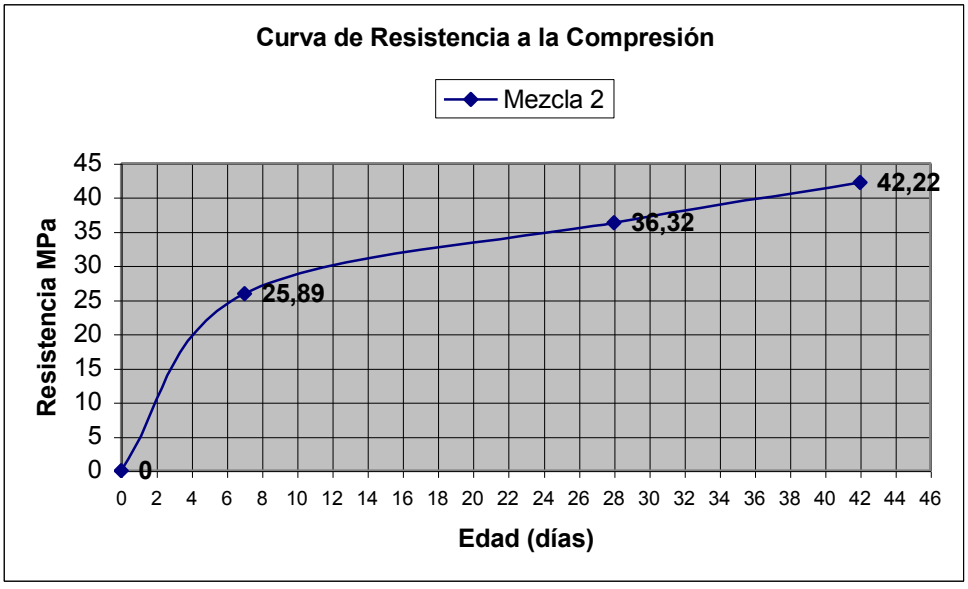
RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION MEZCLA 2

MUESTRA	*EXTENDIDO cm*	*EDAD días*	*DENSIDAD Kg/m3*	*f 'c MPa*
2	70	7	2210	25.89
	70	28	2216	36.32
	70	42	2218	42.22

Para esta Mezcla se utilizó:

A/C 0.45
Sika Viscocrete 5 1.5 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.



3.2 OTRAS CARACTERISTICAS DEL HORMIGON

Además de determinar la resistencia del hormigón existen otros ensayos los cuales nos permiten tener una idea mas clara acerca de las características y comportamiento de los hormigones mencionados.

Hormigón Proyectado

Determinación del Rebote

La determinación del Rebote en el Hormigón Proyectado consiste en cuantificar el porcentaje de pérdida del hormigón al proyectarse sobre las paredes del túnel.

1. Se coloca una lona de plástico sobre el suelo al pie de la pared donde se gunitará.
2. Se procede a proyectar el hormigón en el área especificada y con un espesor determinado.
3. El hormigón que no se adhiere a la pared y caiga sobre la lona será recogido y medido.
4. La diferencia en porcentaje entre el hormigón total usado y el que quedo en la lona es la cantidad de rebote o pérdida.

El porcentaje de rebote en obra para este proyecto se optimizó hasta llegar a un valor de 10%, esto dependió de algunos factores tales como:

- La Relación A/C
- Granulometría de los agregados

- Los tipos de aditivos utilizados
- Angulo de proyección y distancia; y la velocidad de proyección.
- El tipo de diseño de la gunitadora o de la habilidad del gunitador

Hormigón Baja Retracción

Determinación del Contenido de Aire

El contenido de aire mide la cantidad de burbujas de aire en el hormigón fresco. El aire se adiciona a propósito para darle resistencia a la congelación y descongelación. Mucho aire da una baja resistencia. Para llevar a cabo la prueba de contenido de aire se siguió la norma AST C 231. Después de algunos muestreos se llegó a la dosificación del 0.07% con respecto al peso de cemento el cual permite incorporar 4% de aire a la mezcla para mejorar la propiedad de durabilidad del hormigón [19] (ver foto en el Anexo).

Determinación de las Retracciones

Para la determinación o medición de las retracciones en el diseño de hormigón de baja retracción se siguió la norma ASTM C – 157, fueron premoldeadas pequeñas vigas de 300 mm. de longitud y de sección de 100 mm. x 100 mm.

Los resultados de este ensayo se muestran a continuación:

MEZCLA T-2

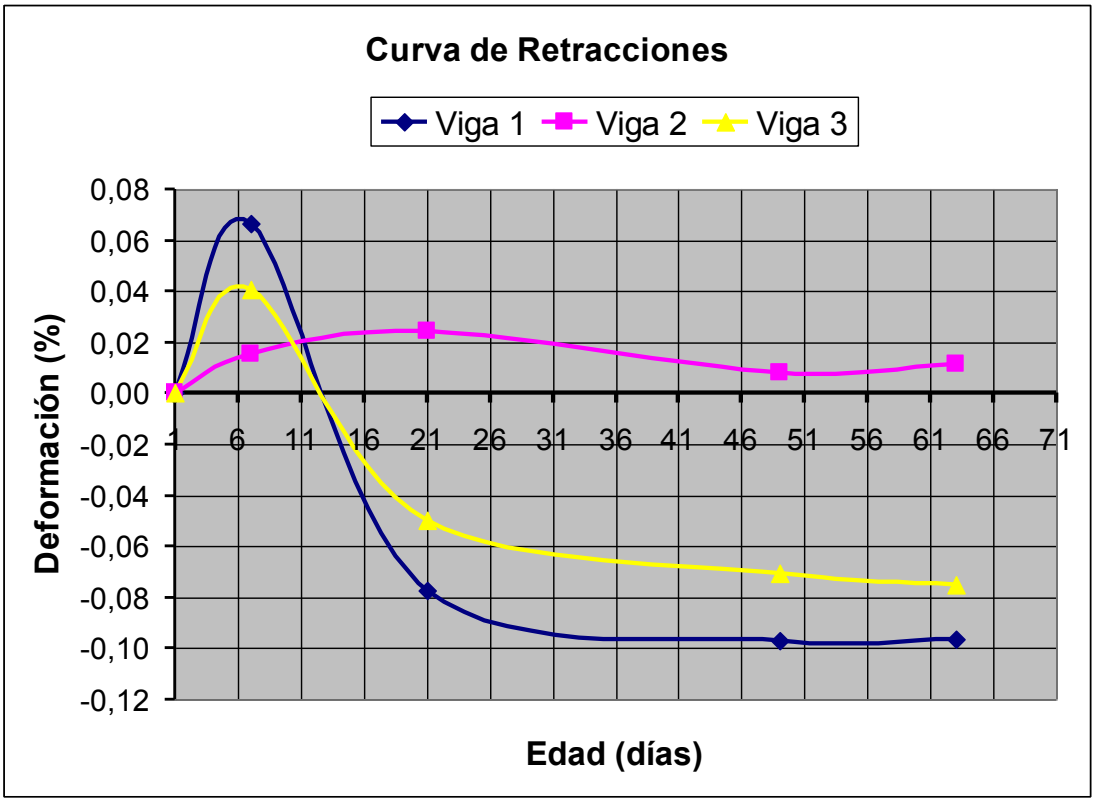
Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.35
Sika Aer	0.07 %
Sikament N100	1.50 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.

TABLA 3.12

Muestra Nº	*Lecturas relativas*					*Deformación (%)*				
	Lo	L				1	7	21	49	63
	1día	7 días	21 días	49 días	63 días	(días)				
Viga-1	2,5426	2,7090	2,3493	2,3006	2,3020	0,00	0,0665	-0,0773	-0,0968	-0,0962
Viga-2	3,6136	3,6526	3,6740	3,6340	3,6420	0,00	0,0156	0,0241	0,0081	0,0113
Viga-3	2,6086	2,7103	2,4840	2,4326	2,4213	0,00	0,0406	-0,0498	-0,0704	-0,0749



Viga 1 y Viga 3 : Cámara Seca
Viga 2 : Sumergida en agua

MEZCLA T-3

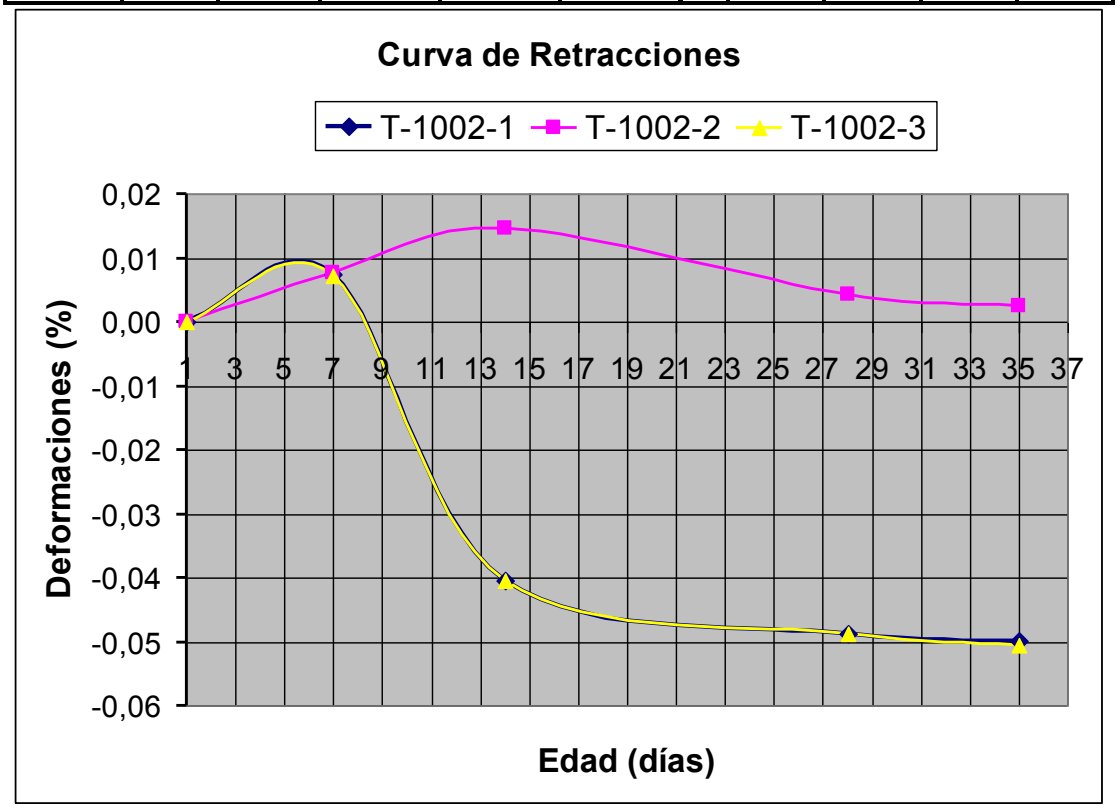
Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.34
Sika Aer	0.07 %
Sikament H200	1.50 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.

TABLA 3.13

Muestra Nº	*Lecturas relativas*					*Deformación (%)*				
	Lo	L				1	7	14	28	35
	1 día	7 días	14 días	28 días	35 dias	días				
T-1002-1	2,4413	2,4600	2,3400	2,3193	2,3167	0,0	0,0074	-0,0405	-0,0488	-0,0498
T-1002-2	2,4400	2,4593	2,4767	2,4507	2,4460	0,0	0,0077	0,0146	0,0042	0,0024
T-1002-3	2,4427	2,4607	2,3413	2,3210	2,3160	0,0	0,0072	-0,0405	-0,0486	-0,0506



T-1002-1 y T-1002-3 : Cámara Seca
T-1002-2 : Sumergida en agua

MEZCLA T-4

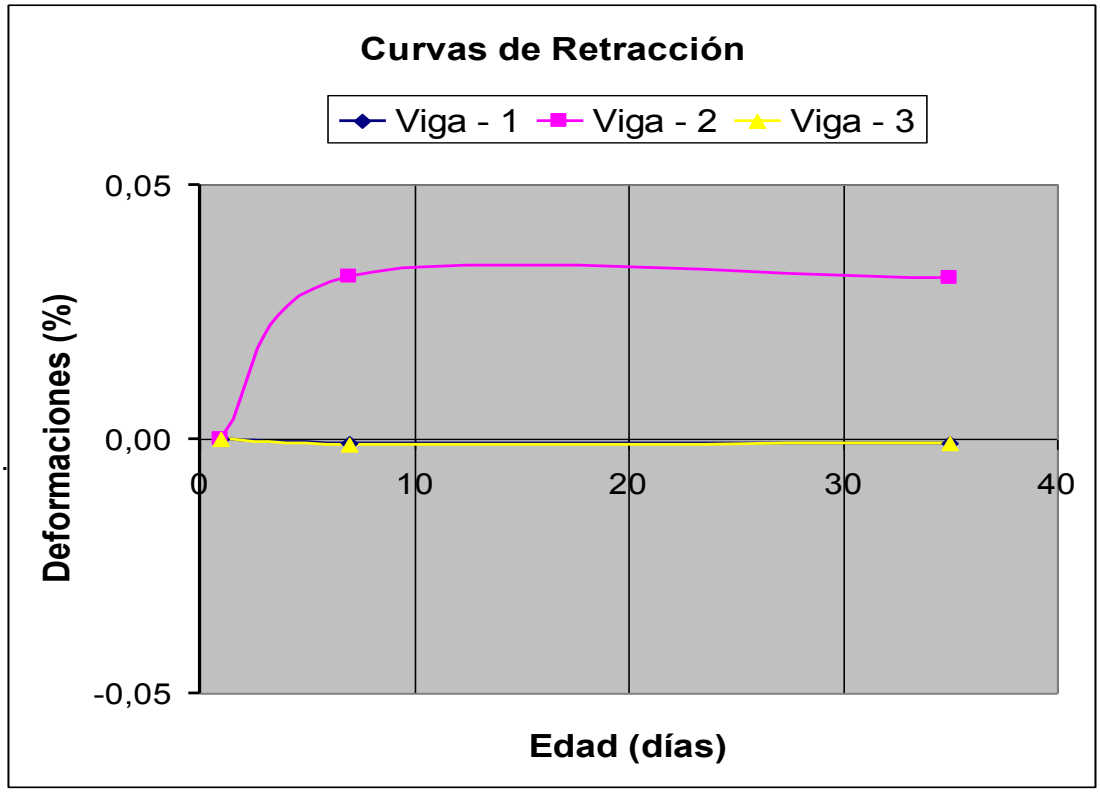
Para esta Mezcla se utilizó:

A/C	0.34
Sika Aer	0.07 %
Sikament N100	1.50 %
SikaControl 40	2.00 %

Los Agregados son procedentes de Calcáreos Huayco.

TABLA 3.14

Muestra Nº	*Lecturas relativas*			*Deformación (%)*		
	Lo	L		Días		
	1 día	7 días	35 días	1	7	35
Viga - 1	2,8103	2,8083	2,8083	0,00	-0,00080	-0,0008
Viga - 2	2,3450	2,4247	2,4240	0,00	0,03187	0,0316
Viga - 3	2,8113	2,8087	2,8090	0,00	-0,00107	-0,00093



Viga 1 y Viga 3: Cámara Seca
Viga 2 : Sumergida en agua

Hormigón Autocompactante

Determinación de la Manejabilidad Libre

La manejabilidad libre determina y cuantifica la fluidez de la masa y se relaciona también con la viscosidad de este.

El ensayo consiste en rellenar el Cono de Abrams sin compactar ni varillar, levantar el cono sobre una placa no absorbente húmeda y controlar la expansión diametral de la masa y el tiempo de la fluencia

El diámetro de la masa descargada debe estar entre 65-75cm y donde el tiempo en que la masa ha alcanzado los 50cm este entre los 3-5 seg. El hormigón debe fluir libremente sin indicios de exudación y formando una “torta” circular.

En la Muestra 1 se obtuvo un extendido de 65cm.

En la Muestra 2 se obtuvo un extendido de 70cm.

Determinación de la Manejabilidad Controlada

La manejabilidad controlada se relaciona con la resistencia a la segregación del hormigón al traspasar zonas de armadura. El procedimiento de ensayo consiste en rellenar hasta enrase la caja forma de L de dimensiones indicada y levantar la compuerta de tal modo que el hormigón descargue libremente. Se controla su

capacidad autonivelante en presencia de obstáculos, el bloqueo en las barras y el tiempo de fluencia [20] (ver foto en el Anexo).

- Bloqueo en las barras: Sin indicios de bloqueo
- $H_{x\ cm}/H_{0\ cm}$ (autonivelación) > 0.80
- T_{40} (tiempo de fluencia) es de 3 a 5 seg.

En la Muestra 1 se obtuvo un $H_{x\ cm}/H_{0\ cm} = 0.82$ y $T_{40} = 5$

En la Muestra 2 se obtuvo un $H_{x\ cm}/H_{0\ cm} = 0.85$ y $T_{40} = 3.8$

3.3 CALIDAD DE LOS MATERIALES

Para la categorización y clasificación de los agregados se siguió la norma ASTM C33.

Hormigón Proyectado

Los agregados a utilizar provienen de la Cantera de Pifo y el Cemento de la Cementera Selva Alegre, el ensamblaje granulométrico utilizado para el agregado grueso y fino respectivamente fue:

Piedra 3/4	30%	Arena de Río	50%
Piedra 3/8	70%	Arena Triturada	50%

TABLA 3.15

CARACTERISTICA DE AGREGADO GRUESO

Agregado Grueso	***Kg/dm3***
Dsss	2.4
Peso Volumétrico Suelto	1.16
Peso Volumétrico Compactado	1.43
Absorción	2 %
Abrasión L.A	24 %

TABLA 3.16

CARACTERISTICAS DE LOS ADITIVOS

Aditivo o Adiciones	***Nombre***	***Características***	***Dosificación***
Superplastificante	Rheobuild 726	♦ Mejor trabajabilidad. ♦ Evita segregación. ♦ Protege el acero de corrosión.	1.5% del peso del Cemento
Hiperplastificante	Sika ViscoCrete-2	♦ Mejora la Manejabilidad. ♦ Reducción de Agua. ♦ Alto desarrollo de las resistencias ♦ Reduce riesgo de carbonatación. ♦ Mejora Impermeabilidad.	1.5% del peso del Cemento

Acelerante de Fraguado y resistencias iniciales	Sigunit L22	♦ Reduce Rebote. ♦ Incrementa la adherencia del hormigón proyectado. ♦ Sin cloruros. ♦ Rápido fraguado. ♦ Rápida obtención de resistencias iniciales.	6% del peso del Cemento
Microsílice	Rheomac SF 100	♦ Reduce la permeabilidad. ♦ Mayor resistencia a la compresión. ♦ Mejora la durabilidad. ♦ Resistencia a la abrasión y al desgaste.	15% del peso del Cemento

Hormigón Baja Retracción

Los agregados a utilizar provienen de la Cantera Huayco y el Cemento de HOLCIM, el ensamblaje granulométrico utilizado entre el agregado grueso y fino respectivamente fue:

Piedra 3/4 50% Arena de Río 65%

Piedra 1/2 50% Arena Triturada 35%

TABLA 3.17

CARACTERISTICA DE LOS AGREGADOS

Propiedades	*Piedra ¾"*	*Piedra ½"*	*Arena Rio*	*Arena Hom.*
Dsss	2620 kg/m3	2600 kg/m3	2600 kg/m3	2570 kg/m3
Peso Volumétrico Suelto	1300 kg/m3	1274 kg/m3	-	-
Peso Volumétrico Compactado	1416 kg/m3	1381 kg/m3	-	-
Mod. Finura	7.39	6.61	1.97	2.86
Absorción	1.7 %	1.8%	3.0	3.0
Abrasión L.A	24 %	22 %	-	-

TABLA 3.18

CARACTERISTICA DE LOS ADITIVOS

Aditivo o Adiciones	*Nombre*	*Características*	*Dosificación*
Incorporador de Aire	Sika Aer	♦ Controla exudación hormigón fresco ♦ Aumenta la impermeabilidad ♦ Aumenta la durabilidad del hormigón al contacto con aguas agresivas	0.07% del peso del Cemento

Super plastificante	Sikament N-100	♦ Mejora la manejabilidad. ♦ Reducción de Agua. ♦ Incremento de las resistencias iniciales ♦ Reduce riesgo de carbonatación..	1.5% del peso del Cemento
Controlador de Retracciones	SikaControl-40	♦ Disminución de las retracciones por secado ♦ Mejora la cohesión de los poros del concreto ♦ Reduce la perdida de agua ♦ No modifica las resistencias finales del concreto	2% del peso del Cemento

Hormigón Autocompactante

Los agregados a utilizar provienen de la Cantera Huayco y el Cemento de la HOLCIN, el ensamblaje granulométrico utilizado entre el agregado grueso y fino fue:

Piedra 1/2 45%

Arena 55%

TABLA 3.19

CARACTERISTICA DE LOS AGREGADOS

Propiedades	*Piedra ½"*	*Arena Rio*	*Arena Hom.*
Dsss	2600 kg/m3	2600 kg/m3	2570 kg/m3
Peso Volumétrico Suelto	1274 kg/m3	-	-
Peso Volumétrico Compactado	1381 kg/m3	-	-
Mod. Finura	6.61	1.97	2.86
Absorción	1.8%	3.0	3.0
Abrasión L.A	22 %	-	-

TABLA 3.20

CARACTERISTICA DE ADITIVO

Aditivo o Adiciones	*Nombre*	*Características*	*Dosificación*
Hiper plastificante	Sika ViscoCrete-5	♦ Mejora la Trabajabilidad. ♦ Reducción de Agua. ♦ Mejora resistencias ♦ Reduce riesgo de carbonatación. ♦ Mejora comportamiento del hormigón en todas sus propiedades.	1.2 - 1.5% del peso del Cemento

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hormigón Proyectado

- La utilización de un agregado grueso de tamaño máximo $^{3}/_{4}$" (19 mm) y $^{3}/_{8}$" (9 mm) en combinación con la arena de río y arena triturada ayudó a obtener una curva granulométrica óptima. Se llegó a la mejor proporción, siendo el 55% de agregado fino y el 45% de agregado grueso en el diseño del Hormigón Proyectado para el revestimiento del túnel por vía húmeda.

- La utilización de un agregado grueso de tamaño máximo 3/4" (19 mm) y 3/8" (9 mm) con la arena de río y arena triturada ayudó a tener un óptimo ensamblaje granulométrico. Se llegó a una mejor proporción, el 70% de agregado fino y 30% de agregado grueso en el diseño del Hormigón Proyectado estructural de soporte del túnel por vía húmeda.

- Las relaciones agua – cemento para los dos tipos de Hormigones estructural de soporte y de revestimiento fueron 0.36 y 0.47 respectivamente. La menor relación agua / cemento incrementa la resistencia del hormigón.

- Para el hormigón proyectado por vía húmeda es necesario el uso de aditivos reductores de agua o superplastificantes, para mejorar la manejabilidad y transportabilidad requerida. Los aditivos utilizados fueron Rheobuild 726 y el Viscocrete 2.

- La reducción del rebote del hormigón proyectado se logró con la utilización de un aditivo especial, el Sigunit L22, que redujo el rebote hasta un 10%, mejorando la adherencia del hormigón a las paredes del túnel.

- La incorporación de microsílice en el hormigón proyectado, tuvo como objetivo alcanzar una mayor resistencia a la abrasión y a la corrosión, además de aumentar la resistencia a la compresión obteniendo un concreto de mayor calidad.

- Con la presencia de fibras de acero en el hormigón se obtuvo una mayor ductilidad, mejorando la resistencia a la fisuración y al impacto,

es decir, haciéndolo resistente a deformaciones considerables sin disminuir su capacidad portante.

Hormigón de baja retracción de uso de túneles

- La granulometría de la mezcla fue una combinación de cuatro tipos de agregados que permitieron que la mezcla sea homogénea, fue la clave la interacción de la pasta con los agregados, para esto se utilizó un 45% de agregado fino esto es arena de río y arena homogeneizada (70% y 30 % respectivamente) y 55% de agregado grueso, piedra ½" y piedra ¾" (50% y 50%).

- En lo que refiere a la relación agua / cemento, después de haber sido realizado los ensayos de medición de retracción, se pudo apreciar que mientras menor es la relación A/C, menor es la retracción, en este caso se podría establecer valores entre 0.30 y 0.35, tal como lo recomienda el ACI.

- Las probetas de compresión de la primera mezcla presentaron valores de resistencias relativamente bajos (21 MPa a los 28 días) con una relación A/C de 0.40, para la segunda mezcla se redujo la relación A/C a 0.35 resultando así valores de 27 MPa a los 28 días, para las

siguientes mezclas (T-3 y T-4), se utilizó una relación A/C de 0.34, pero el incremento fue mayor llegando a 40 MPa a 28 días.

- La incorporación de aire fue fundamental en este tipo de hormigón pues se requería durabilidad como característica primordial y mejor resistencia a la fisuración, así que se le adicionó después de varias pruebas un porcentaje adecuado de aditivo, llegando a un valor de 0.07 % del peso del cemento, que adiciona un 4% de aire a la mezcla, esto es en total un 6% de aire atrapado en la mezcla, el aditivo utilizado para esto fue el Sika Aer, un aditivo que en poca proporción como se mencionó anteriormente produce un aumento gradual de aire, por este motivo se debió de adicionar en la parte final del proceso de mezclado.

- En la última mezcla T-4, se usó un aditivo controlador de retracciones llamado Sika Control 40, la dosificación fue la misma que en la mezcla T-3, relación agua / cemento 0.34, el aditivo no produjo alteración de las resistencias.

- Si se comparan los valores de retracciones medidos en las tres mezclas, se pudo apreciar que en la última de estas, es decir, con el Sika Control 40 y la misma cantidad de Sika Aer, los valores de las

retracciones están por debajo 0.01 % (0.008 %), lo que no ocurrió con las dos mezclas anteriores en donde en T-2 se obtuvo valores de hasta 0.09 y en T-3 valores de hasta 0.05, que a efectos de obtener baja retracción se considera muy satisfactorio.

- La conclusión general es que un hormigón de baja retracción debe de tener una granulometría homogénea, baja relación agua / cemento entre 0.30 y 0.35 en el caso del proyecto, incorporación de aire para mejorar la durabilidad y por último si es posible utilizar un aditivo controlador de retracciones.

Hormigón Auto Compactante

- La cantidad apropiada de finos a utilizar es importante para conseguir una mejor cohesión y consistencia del hormigón además para evitar la segregación y controlar la exudación. La utilización de un agregado grueso de tamaño máximo de 1/2" (12.5 mm) junto con la arena de río y arena triturada, ayudó a tener una curva granulométrica óptima. Se llegó a la proporción de 55% para el agregado fino y 45% de agregado.

- El aditivo tiene una influencia considerable por lo que si la cantidad es insuficiente producirá una baja fluidez; y una sobre dosificación puede

causar segregación y exudación en el hormigón. El aditivo utilizado fue un hiperplastificante llamado SikaViscocrete-5, el cual mejora el comportamiento del hormigón en todas sus propiedades.

- Mediante las pruebas realizadas de flujo libre y controlado, y de las diversas combinaciones en cantidad de peso de cemento se llegó a la conclusión de que para obtener un mezcla óptima se requiere una cantidad de cemento de 450 a 500 kg. por m^3, esto a su vez ayudó al incremento de resistencia.

- Una relación agua / cemento de valores entre 0.40 y 0.45, son adecuadas para este tipo de hormigón, ya que éstas mejoran la manejabilidad. Los ensayos de caja L y extendido permitieron llegar a esta conclusión. Esto permitió una mejor interacción pasta agregado sin peligro de segregación de la mezcla.

- En lo que respecta a la estructura de un túnel, se pudo concluir que este tipo de hormigón es de gran ayuda en su colocación y por consiguiente se reducen costos por puesta en obra de concreto, la facilidad de colado de este permite evitar el uso de vibradores convencionales y de pared.