

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

1.1.1 El problema

Las fisuras en el hormigón, son roturas que aparecen generalmente en la superficie del mismo debido a la existencia de tensiones superiores a su capacidad de resistencia. Cuando la fisura atraviesa de lado a lado el espesor de una pieza se convierte en grieta.

El mayor problema se presenta cuando la retracción no puede realizarse libremente, es decir el hormigón se encuentra restringido a los cambios volumétricos, ya sea por problemas de vínculos, encofrados, o por la forma del elemento constructivo. Este impedimento puede provocar una importante fisuración la cual atenta contra la durabilidad y futuro comportamiento del hormigón, por cuanto las fisuras además de provocar el debilitamiento del material, facilitan su agresión física y química, y especialmente, la de las armaduras, y puede afectar su capacidad para soportar las cargas de diseño, además de dañar su apariencia.

Hay que distinguir dos aspectos de la contracción: la producida por el fragüe de la pasta de cemento en la fase de endurecimiento (retracción por fragüe) y la otra que es producto de las variaciones del contenido de humedad del hormigón (contracción o expansión). Esta última es la que comúnmente se denomina contracción o retracción por secado. La exposición del hormigón a un ambiente no saturado de humedad provoca su contracción, tanto en estado fresco como endurecido. Este fenómeno, es favorecido a su vez, cuando existe una considerable acción del viento y también cuando aumenta la temperatura.

1.1.1.1 Planteamiento

En la bibliografía se hallan menciones frecuentes al uso de fibras sintéticas en hormigones de cemento portland, buscando cambiar su reología y generar principalmente un control de la microfisuración.

Las fisuras por retracción son pequeñas, fisuras irregulares que pueden desarrollarse en el hormigón durante las primeras 6 horas después de su colocación. No deben confundirse con las fisuras superficiales, dado que las fisuras por contracción usualmente pasan a través de todo el espesor de la losa.

Los fabricantes de fibras sintéticas afirman que sus productos pueden ser usados para minimizar la fisuración por retracción plástica o por secado prematuro. Mezclando las fibras en el hormigón en los dosajes recomendados resulta en millones de fibras dispersas uniformemente en la matriz del hormigón. Este refuerzo multidimensional supuestamente otorga al hormigón mayor capacidad de resistencia a tracción. Si se forman las fisuras por retracción, las fibras unen estas fisuras, ayudando a reducir su longitud y anchura.

Los efectos de las fibras sobre el comportamiento del hormigón plástico y endurecido varían dependiendo de los materiales del hormigón, proporciones de la mezcla, tipo y longitud de la fibra, y cantidad de fibra agregada.

De tal forma se plantea una alternativa de solución al problema de las Fisuraciones producidas por retracción plástica, aplicando fibras de caucho en dimensiones de acuerdo al tamaño máximo del agregado $\phi_{agr} \geq 2 L \text{ Fibra O MENOR}$.

En donde:

ϕ_{agr} = Diámetro del agregado

L = longitud de la FIBRA DE CAUCHO

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la reducción de fisuras por retracción plástica en el hormigón aplicando fibras de caucho.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las características de los agregados para la elaboración de mezclas, mediante ensayos de laboratorio para grava y arena, estableciendo la calidad de los mismos.

- Estudiar el comportamiento en laboratorio del HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRAS DE CAUCHO mediante testigos que en este caso serán réplicas de losas de hormigón según la norma ASTM 1579-06 en el cual se medirán las Fisuraciones y se hará un análisis comparativo con las losas de un HORMIGÓN PATRÓN.
- Elaborar una dosificación patrón con el método ACI-211.
- Determinar las resistencias a la compresión del hormigón tomando como testigos probetas cilíndricas de 15cm x 30cm.
- Analizar, mostrar y comparar los resultados para cada mezcla realizada, de forma gráfica y analítica.
- Analizar distintos porcentajes de caucho triturado entre 0.025% - 0.10% en función a 1m^3 de hormigón para adherirlos a la mezcla de hormigón.
- Determinar la mezcla que se ajusta más a los parámetros establecidos y sujetos a comprobación.
- Analizar la posibilidad de utilizar material reciclado de caucho triturado para la incorporación en las mezclas de hormigón.
- Establecer los costos de producción de las mezclas.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación teórica

La presente investigación pretende, hacer un análisis de reducción de Fisuraciones provocadas por la retracción plástica del hormigón, tanto por retracción plástica como por secado; aplicando fibras de caucho, el cual se añadirá al hormigón como un complemento para poder alcanzar el objetivo de la presente investigación.

1.3.2 Justificación metodológica

Para poder cumplir los objetivos, se hará el análisis de la mezcla del hormigón con fibras de caucho las cuales actuarán como fibras sintéticas para la reducción de Fisuraciones ocasionadas en las primeras 24hrs. Para esto se realizarán dosificaciones de acuerdo a la norma ASTM 1579-06 para hormigones; estos porcentajes según la

bibliografía consultada variarán entre 0.025% hasta 0.10%, en las cuales se aplicará fibras de caucho de forma manual directamente incorporando al tambor de la mezcladora y ésta será la mezcla que se vaciará en testigos de losas y probetas para su estudio; para lo cual también se hará una comparación con un hormigón patrón.

Las fibras de caucho se obtendrán de las plantas trituradoras ubicadas en Quillacollo ciudad de Cochabamba o en la ciudad de Santa Cruz.

El costo del material aproximado es de 700 \$ a 900 \$ la tonelada dependiendo del departamento al cual será puesto el material, esto da un precio aproximado de 5 a 6 Bs por Kg. El costo en cantidades menores se incrementa en un 10% a 15%, lo cual nos da una referencia que es un precio relativamente barato para el uso de este material en hormigones.

Los ensayos de laboratorio se realizarán de la siguiente manera:

Para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón se hará el armado del molde cilíndrico de 15x30 cm lo cual a su posterior colocado del hormigón se procederá al rompimiento de la probeta y se determinará su resistencia en (kg/cm²) ASTM C1579-06.

Para el análisis de las Fisuraciones en el hormigón se determinarán de la siguiente manera:

Primeramente se harán las réplicas de losas de hormigón que para nuestro estudio se analizarán para el máximo tamaño de agregado grueso igual o menor de 19 mm, utilizar un molde con una profundidad de 100 ± 5 mm dimensiones rectangulares de 355 ± 10 mm por 560 ± 15 mm El molde se puede fabricar de metal, plástico, o madera contrachapada.

Los paneles de control de hormigón y hormigón reforzado con fibras se preparan de una manera prescrita y están expuestos a condiciones de secado controladas después de terminar. Las condiciones de secado están destinados a ser lo suficientemente grave como para inducir agrietamiento por contracción plástica en paneles de control de

prueba hecho de hormigón. La velocidad de evaporación de una superficie de agua libre es monitoreada por recipientes que se depositen junto a los paneles en una cámara ambientada.

1.3.3 Justificación práctica

La investigación propuesta permitirá comprobar soluciones viables al problema de la fisuración en la etapa de fraguado del hormigón, con lo cual se buscará dar una alternativa la fibras de caucho como refuerzo del hormigón y poder combatir estas patologías en la etapa temprana de la confección del hormigón, como así también tratar de utilizar un material reciclado en las mezclas para la fabricación de elementos estructurales.

1.4 Alcance del estudio

1.4.1 Consideraciones generales

Para el posterior estudio, de acuerdo a la metodología elegida, se pretende realizar el siguiente análisis:

Para el hormigón patrón: análisis de las patologías mencionadas en el trabajo de investigación y su desarrollo en laboratorio.

Para el hormigón con Fibras de Caucho: aplicación de distintos porcentajes de fibras de caucho que variará entre 0.025% 0,05% y 0.10% para 1 metro cúbico de mezcla de hormigón.

Caracterización de los materiales.

Dosificación de Mezclas.

Ensayo ASTM 1579-06 (para el análisis de fisuración del H° patrón y el H° con Fibras)

Determinación de la resistencia a compresión.

1.4.2 Análisis de alternativas

Existen algunas alternativas para la reducción de fisuras en el hormigón las cuales se presentan a continuación:

Mediante la incorporación de aditivos SIKA los cuales existen en nuestro medio.

También se realizan métodos mejor llamados que se aplican in-situ en los cuales se colocan paneles de nylon encima del hormigón recién vaciado para evitar los agentes externos como el viento que es el principal factor de la formación de fisuras.

Otra forma de evitar fisuras es la adición de fibras sintéticas como por ejemplo fibras de hierro, fibras de polipropileno, nylon, etc.

Para nuestro estudio vamos a hacer un análisis de fibras sintéticas naturales que en nuestro caso son las fibras de caucho, las cuales se obtienen de la trituración del caucho reciclado de las gomas d autos y otros.

Características Físicas del Hormigón Convencional

Se indican valores aproximados:

Densidad: Igual o mayor a los 2400 kg/m³.

Resistencia a la compresión: de 100 a 500 kg/cm² para el hormigón ordinario. Existen hormigones especiales de hasta 2000 kg/cm².

Resistencia a la tracción: proporcionalmente baja, generalmente despreciable en el cálculo global, del orden de un décimo de la resistencia a la compresión.

Concepto de refuerzo del hormigón con fibras

Reseña histórica de la tecnología de incorporación de fibras al hormigón

Las fibras con una adecuada resistencia mecánica a la tracción, homogéneamente distribuidas dentro del hormigón, constituyen una micro-armadura la cual, se muestra extremadamente eficaz para contrastar el fenómeno de fisuración por retracción y, además de conferir al hormigón una ductilidad (1) que puede llegar a ser considerable

en la medida en que sea elevada la resistencia de las fibras y su cantidad, confiriendo en tales circunstancias una gran tenacidad (2) al hormigón.

Como es conocido, en la mayoría de los actuales códigos de diseño, la resistencia a tracción del hormigón (debido a su conducta frágil), es normalmente despreciada dentro de las consideraciones de cálculo. Con la inclusión de una matriz fibroreforzada, esta propiedad de resistencia a tracción se logra estabilizar, de manera tal que la misma puede ser considerada como propiedad mecánica con fines de diseño.

- **Hormigones con fibras de refuerzo**

Usadas las fibras inicialmente para reducir el agrietamiento por contracción plástica del concreto, el mercado consistía principalmente en la presencia de fibras sintéticas de polipropileno y nylon.

El uso de fibras se hizo imprescindible en el concreto celular, ya que las deficiencias de una mezcla fluida, se ven afectadas por el secado o una deshidratación rápida, lo que ocasiona contracciones, sin embargo, estas contracciones son controladas gracias al uso de la fibra de polipropileno.

De estas fibras deben usarse las del tipo de segunda generación, es decir las que forman una malla tridimensional de refuerzo con el fin de evitar los problemas de curado, por otro lado, los productos de concreto celular prefabricados son más susceptibles mientras ganan buena parte de su resistencia, por lo que al moverlos entre el tercero y sexto días son susceptibles a despiques, la fibra ayuda a controlar esos movimientos y a controlar las grietas por golpes.

El concreto con fibras es apropiado para superficies grandes que tiendan a fracturarse precisamente por su longitud muros, losas, pavimentos y pisos industriales.

Como se mencionó, la adición de fibras de diversas clases y tipos al concreto celular, puede reducir la desfavorable contracción.

Los beneficios de la adición de fibras al concreto celular de baja densidad son considerables, estas fibras pueden reducir notablemente la formación de fisuras por

contracción plástica o por secado e incrementan la resistencia a la flexión y a la tensión.

La fibra debe ser resistente al álcali; puede tratarse de resinas sintéticas o de fibra de vidrio, fibras de polietileno, polipropileno o acero según las necesidades del proyecto. La cantidad utilizada está determinada por la trabajabilidad del concreto y el costo.

- **Hormigones con Cascote de Ladrillo**

Como su nombre lo indica, es ladrillo triturado. Éste está conformado por un 80% de arcilla, con el agregado del material ligante, más impurezas. Químicamente la arcilla está compuesta por: 45% a 70% de sílice, 10% a 40% de alúmina y 10% a 20% de agua.

Es un material proveniente de los hornos de ladrillos, residuos de la fabricación de baldosas o recuperación de escombros, que previa limpieza de impurezas, trituración y cribado pueden ser usados como agregados.

El material puede ser obtenido por machaqueo de piezas de ladrillo o a partir de escombros de construcción, en este caso se deberá tener cuidado de que se reduzca al mínimo el contenido de impurezas o mezclas con otro material.

Constituye un agregado liviano de mayor peso específico aparente que los descriptos anteriormente (peso específico del material suelto y seco: 900 a 1200 kg/m³). Su porosidad depende de la naturaleza de las tierras utilizadas y del proceso de elaboración.

- **Hormigones con arcilla expansiva**

Las propiedades más sobresalientes que se puedan obtener son:

Reducción aproximada de un 30% del peso total de la estructura sin afectar la resistencia. Permite cálculos de secciones estructurales que con áridos pesados, ahorrando materia prima.

Facilidad de acarreo en obra, tanto del agregado como de hormigones frescos. Ahorro de tiempos y jornales.

- **Hormigones con poliestireno expandido**

Densidad - peso específico: Las distintas densidades que se encuentran son: (200 – 250 – 300 – 350) kg/m³

Características de bombeo: Dada la forma esférica del agregado (en el caso de la perlita) el hormigón una vez preparado adquiere una movilidad increíble, permitiéndole el bombeo hasta una altura mayor que 60m.

Trabajabilidad: Gracias también a la forma esférica y a la granulometría de la perlita, se obtiene un hormigón de muy buena trabajabilidad debido a que la trabazón entre perlitas es mínima.

El hormigón realizado con poliestireno posee muy baja retracción y no produce fisuras durante el fraguado, es por esto que puede aplicarse en grandes superficies sin necesidad de juntas de dilatación.

Los elementos constructivos elaborados con este material muestran un excelente comportamiento en caso de incendio, siendo muy aptos para muros contrafuego.

Cuadro Resumen:

En función a lo estudiado, es que vamos a investigar las propiedades tanto físicas como mecánicas de un H^o convencional vs H^o reforzado con fibras de caucho.

1.4.3 Resultados a lograr

Obtención y generación de información necesaria para el desarrollo del estudio y del informe final.

Análisis de laboratorio para los materiales componentes de la mezclas.

Caracterización de las muestras de materiales, comparación de similitudes y diferencias entre ambas mezclas en dosificación.

Dosificación para hormigón estructural $f'c = 210 \text{ Kg/m}^2$, en función a la norma ACI 211.1

Elaboración y rotura de una muestra de probetas tanto para el H^o convencional, como para cada H^o adicionado con fibras en los distintos porcentajes propuestos.

Comparación de los resultados obtenidos del ensayo ASTM 1579-06, en el cual se hará un análisis de las fisuraciones tanto en el H° patrón, como en el H° fibroreforzado.

Comparaciones entre las resistencias obtenidas de ambos ensayos.

Comprobación de la hipótesis planteada en la propuesta.

1.4.4 Hipótesis

Con la aplicación de fibras de caucho a un hormigón convencional en los porcentajes a estudiar de 0.025, 0.050 y 0.10 %, se reducirá las Fisuraciones provocadas por retracción plástica e hidráulica con respecto a una muestra patrón sin refuerzo de fibras, obteniendo así la mejora en la funcionalidad del hormigón y aumentar su durabilidad y mejorar su aspecto estético del hormigón.

VARIABLES:

Variable Dependiente: Retracción Plástica del Hormigón

Variable Independiente: Fibras de Caucho

Variables intervinientes:

- ✓ Dosificación del hormigón PATRÓN.
- ✓ Dosificación del hormigón con FIBRAS DE CAUCHO.
- ✓ Análisis de consistencia del hormigón mediante el cono de abrams (TRABAJABILIDAD).
- ✓ Control de variables (velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, tasa de evaporación.)

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Reseña histórica de la tecnología de incorporación de fibras al hormigón

2.1.1 Antecedentes

Según macafferri 2009, la idea de reforzar con materiales fibrosos manufacturas resistentes pero de elevada fragilidad se remonta a muchos años atrás; en el antiguo Egipto se introducía paja al macizo arcilloso con el cual confeccionaban ladrillos para conferirle una mayor resistencia y por lo tanto una buena manejabilidad después de la cocción al sol.

Existen otros ejemplos históricos de refuerzo con fibras: revoques reforzados con crin de caballo, o también con paja en las construcciones más precarias, para evitar fisuras de retracción, paneles en yeso armado con trenzados de bambú, conglomerados de cemento reforzados con fibras de amianto, etc.

La orientación científica cuanto la tecnología del refuerzo con fibras es indudablemente más reciente.

Son de los años '50 los primeros estudios sobre la utilización de fibras de acero y de vidrio en el hormigón. En los años '60 aparecieron los primeros estudios sobre hormigones reforzados con fibras sintéticas.

La definición del hormigón fibroreforzado en el Boletín Oficial CNR N. 166 parte IV, en Italia es:

“La utilización de fibras en el interior de la matriz del hormigón tiene como finalidad la formación de un material compuesto en el cual el conglomerado, que ya puede ser considerado un material constituido por un esqueleto de agregados disperso en una matriz de pasta de cemento hidratada, está unido a un elemento de refuerzo formado por un material fibroso de diferente naturaleza”.

2.1.2 Concepto de refuerzo del hormigón con fibras

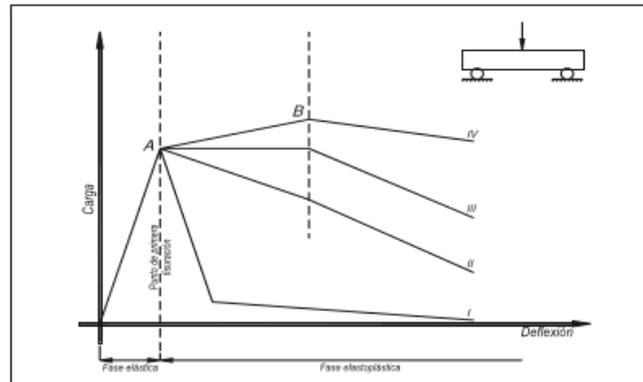
Según macafferri 2009, las fibras con una adecuada resistencia mecánica a la tracción, homogéneamente distribuidas dentro del hormigón, constituyen una micro-armadura la cual, se muestra extremadamente eficaz para contrastar el fenómeno de fisuración por retracción y, además de conferir al hormigón una ductilidad (1) que puede llegar a ser considerable en la medida en que sea elevada la resistencia de las fibras y su cantidad, confiriendo en tales circunstancias una gran tenacidad (2) al hormigón.

Como es conocido, en la mayoría de los actuales códigos de diseño, la resistencia a tracción del hormigón (debido a su conducta frágil), es normalmente despreciada dentro de las consideraciones de cálculo. Con la inclusión de una matriz fibroreforzada, esta propiedad de resistencia a tracción se logra estabilizar, de manera tal que la misma puede ser considerada como propiedad mecánica con fines de diseño. En el capítulo 3 de la presente publicación se expondrá en detalles esta gran ventaja técnica.

Debido a que, por dificultades operativas, generalmente no se realizan sobre el hormigón en- sayos de tracción directa, la evaluación de tal propiedad de resistencia, así como de ductilidad y de tenacidad, se efectúa indirectamente mediante ensayos de flexión sobre vigas o placas, así como se comentará en los capítulos siguientes con más detalle. El gráfico 2.1 ilustra cualitativamente las posibles respuestas, que se pueden obtener mediante los referidos ensayos de flexión, sobre elementos de hormigón fibroreforzado, representadas en su mayoría mediante gráficos de carga vs. Abertura de fisura o carga vs. Deflexión.

Bajo cargas moderadas, inferiores a la de rotura del hormigón, el comportamiento del material es siempre elástico y no se produce ninguna fisuración en la probeta bajo ensayo de flexión, in- dependientemente de la presencia o calidad y cantidad de fibras. Sin embargo, comportamientos bastante distintos se pueden verificar continuando la prueba, incrementando la carga a partir del punto A, denominado “punto de primera fisuración”

FIGURA 2.1 – 1: TENACIDAD DEL HORMIGÓN



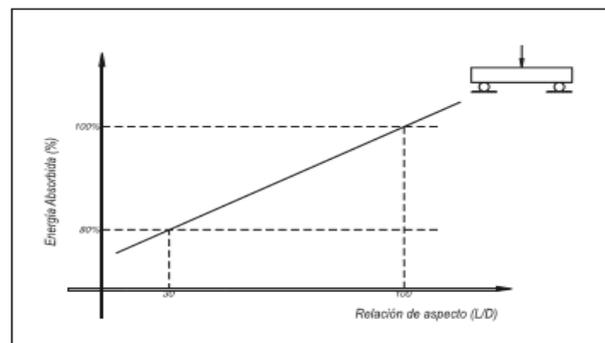
Fuente macaferri 2009

- La curva I esquematiza el comportamiento de un hormigón simple sin refuerzo. La estructura, siendo isostática (la viga simplemente apoyada en sus extremos), una vez alcanzada la carga de primera fisuración, ésta colapsa de inmediato, siendo el típico comportamiento de un material frágil.
- La curva II muestra la capacidad del hormigón (fibroreforzado) para absorber después del punto de primera fisuración cierta carga, aunque baja (A-B), con luego un colapso más lento (comportamiento suavizado).
- La curva III es típica de un material dúctil el cual muestra un hormigón capaz de soportar, a partir del punto de primera fisuración, un desplazamiento importante (A-B) bajo carga constante, bastante antes del colapso que es verificado de una manera más lenta (comportamiento plástico).
- La curva IV finalmente evidencia un hormigón con un cierto incremento de carga portante bajo un amplio desplazamiento (A-B), después del punto de primera fisuración (comportamiento endurecido).

Es importante destacar que todos estos posibles comportamientos, o grados de ductilidad y tenacidad adquiridos por el hormigón, dependen de la cantidad de fibras, sus características mecánicas y geométricas.

En cuanto a la influencia de la geometría de las fibras (formas y dimensiones longitudinales y transversales) sobre el comportamiento del FRC(3) y del SFRC(4), aunque cada aspecto anteriormente mencionado es importante, la relación longitud(L) – diámetro equivalente(D) (denominada relación de aspecto o de esbeltez) es el parámetro más característico, ya que de su valor dependen la ductilidad y la tenacidad del hormigón fibroreforzado (Gráfico 2.1-1).

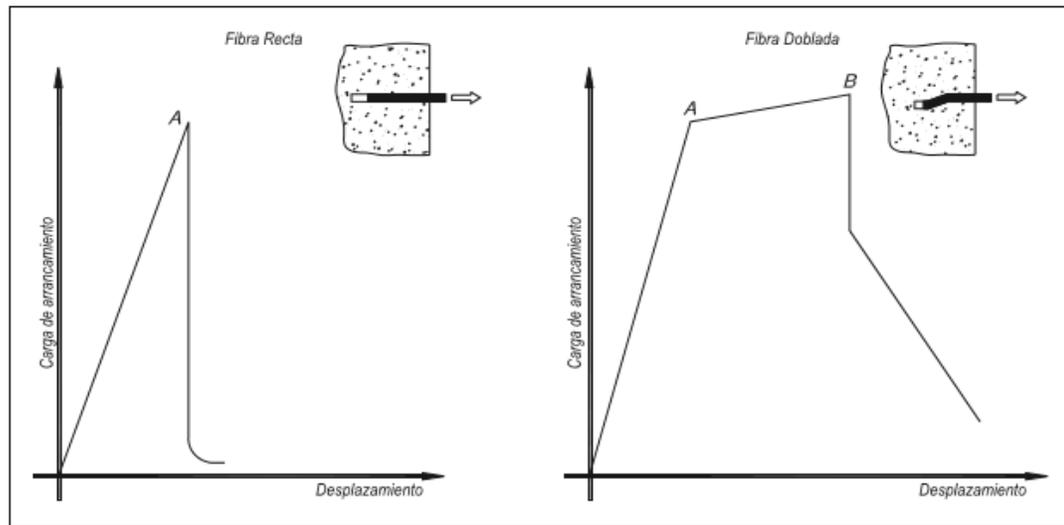
FIGURA 2.1 – 2: FLEXIÓN SIMPLE APLICADA



Fuente macaferri 2009

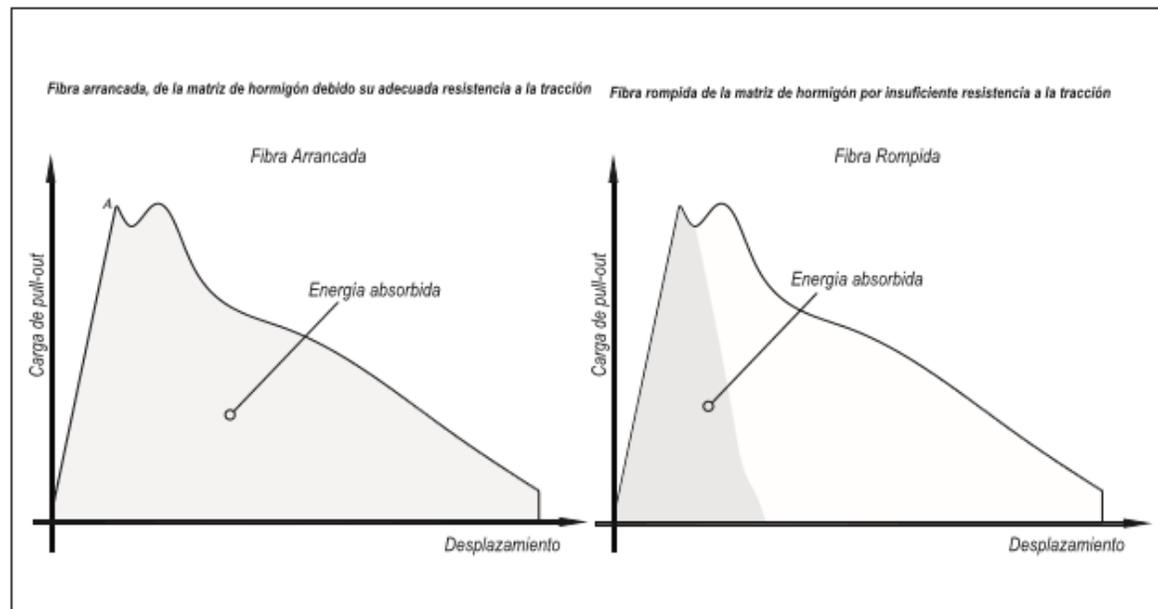
Obviamente las características mecánicas de las fibras, esencialmente su resistencia a la tracción, tienen un papel fundamental en el comportamiento del FRC y del SFRC ya que, al no producirse la extracción (pull out) impedida por la adherencia real e impuesta entre la interfaz fibra-hormigón (Gráfico 2.1-2), puede llevar la rotura de la fibra debido a la insuficiencia de su resistencia a la tracción (Gráfico 2.1-3).

FIGURA 2.1 – 3: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN



Fuente macaferri 2009

FIGURA 2.1 – 4: ADICIÓN DE LA FIBRA AL HORMIGÓN

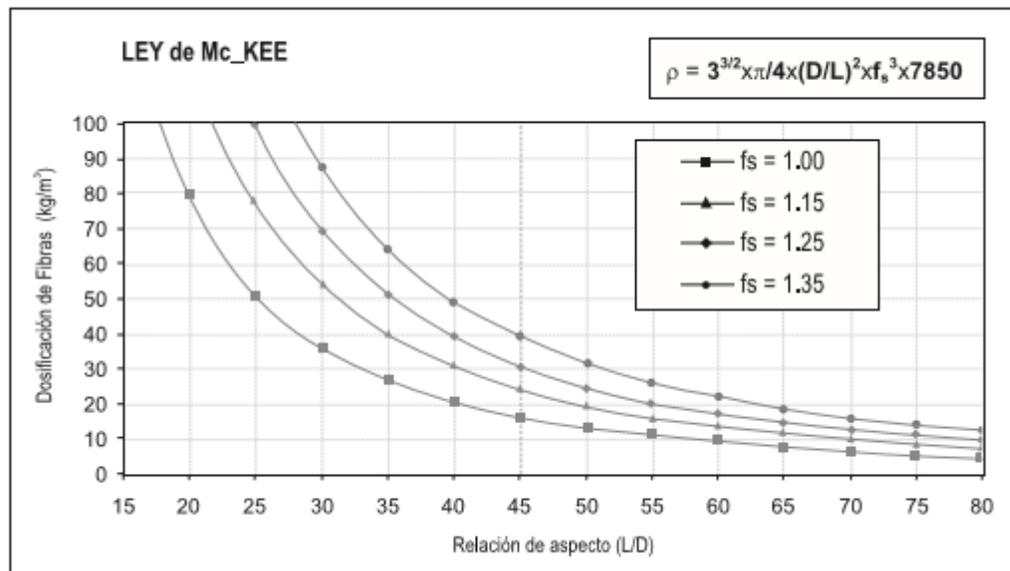


Fuente macaferri 2009

Finalmente la dosificación, o sea la efectiva cantidad de fibras presentes en el hormigón (kg/m^3 , o % V_f (5)), ciertamente incide notablemente, junto con las ya comentadas características geométricas y mecánicas de las fibras, sobre el grado de ductilidad y tenacidad que adquiere el hormigón fibroreforzado (Gráfico 2.1-5)

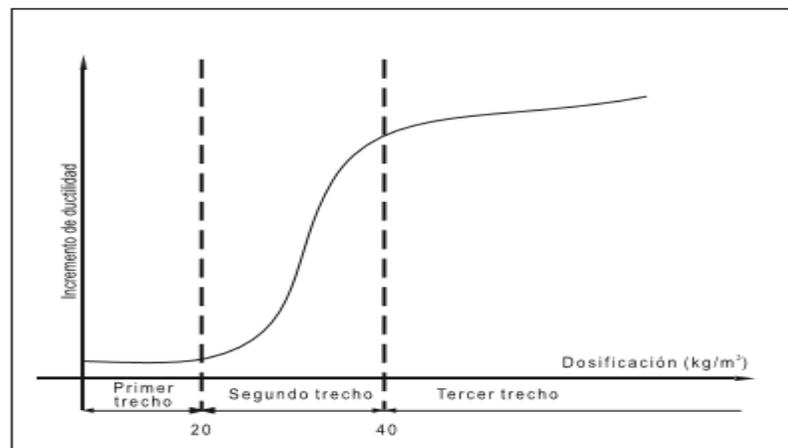
Es interesante observar que con el incremento de la relación de aspecto (L/D) disminuye, dentro de ciertos límites, la cantidad de fibras (dosificación) necesaria para alcanzar un determinado resultado (Gráfico 2.1-4), debido a que estadísticamente se incrementa la resistencia a la tracción, como directa consecuencia del incremento estadístico de la longitud de fibra a extraer.

FIGURA 2.1 – 5: CURVA DE DOSIFICACIÓN SEGÚN LA LEY DE Mc_KEE



Fuente macaferri 2009

FIGURA 2.1 – 6: CURVA INCREMENTO DE DENSIDAD



Fuente macaferri 2009

Es importante destacar que, todo el conjunto de las características mencionadas que es utilizado para determinar el comportamiento del hormigón fibroreforzado y el resultado óptimo depende de una adecuada combinación de todos los factores, ya que cada uno por sí tiene siempre un límite en su influencia, más allá de cual sea el resultado se muestra inútil cuando no es efectivo, como se evidencia claramente (Gráfico 2.1-5) para el caso de la dosificación:

El primer trecho de la curva muestra como una dosificación muy baja prácticamente no tiene efectos (comportamiento suavizado), ya que dispersando pocas fibras en la mezcla, su distancia relativa es tan grande que no produce consecuencia alguna.

El segundo trecho muestra cómo, aumentando el número de fibras, o sea reduciendo el volumen de influencia de cada fibra, se alcanzan configuraciones de superposición estadística de las fibras entre sí con buenas posibilidades de interacción (comportamiento plástico), produciéndose un incremento de la ductilidad del hormigón directamente sensible a la dosificación efectiva.

El tercer trecho muestra finalmente como, más allá de una determinada dosificación (comportamiento endurecido), el incremento de la ductilidad, aumentando por el contrario las dificultades de realizar una mezcla uniforme y fluida.

Para concluir con este capítulo, a propósito de calidad y cantidad de fibras metálicas a introducir en un elemento en SFRC, se pueden avanzar las consideraciones cuantitativas siguientes:

- La relación de aspecto debe también ser suficientemente elevada, entre 20 y 40.
- La dosificación no debe ser inferior a $2-2.5\text{kg}/\text{m}^3$ (0,025%-0,03% en volumen) y puede alcanzar, para las aplicaciones más exigentes, los 5 o $10\text{kg}/\text{m}^3$ (0,5 -1 % en volumen).

2.2 Materiales componentes del hormigón

El concreto cuyas características de resistencia, versatilidad, durabilidad y economía, lo han convertido en el material de construcción más utilizado en el mundo, se puede

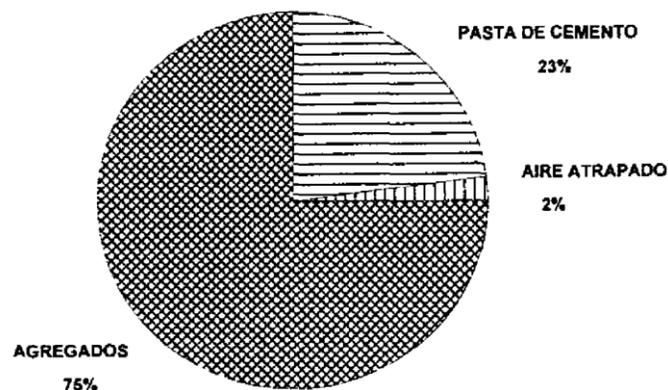
definir como una piedra artificial formada por cemento portland, agregados, agua y aire, material de naturaleza simple pero con una compleja naturaleza interna.

De sus componentes, se tenía la hipótesis de que el cemento era la parte activa que reacciona con el agua, utilizando a los agregados como material de relleno, pero se ha puesto en evidencia que los agregados participan activamente en la vida del concreto.

Con una idea muy general se puede hablar de que los integrantes del concreto se encuentran distribuidos tomando como base su peso en los porcentajes siguientes:

Pasta (Cemento + Agua) de un 23 a un 25 %, Agregados (Grava y Arena) de 73 a 75 % y aire atrapado 2 %.

FIGURA 2.2 – 1: MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGÓN



2.3 Cemento portland

Un cemento se define como un material con propiedades adhesivas y cohesivas que le dan la capacidad de unir fragmentos sólidos para formar un material resistente y durable, constituye entre el 7 y 15 % de volumen total de concreto, es el componente activo de la mezcla y por tanto influye en todas sus características.

Es un conglomerante hidráulico, que proviene de la pulverización del Clinker obtenido por fusión insipiente de materiales arcillosos y calizos, que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y fierro en cantidades convenientemente dosificadas.

Como materia prima del cemento se emplean la caliza y la arcilla es posible sustituirla por otras que tengan sus mismos óxidos.

Se llama cemento Portland al producto que se obtiene pulverizando, en polvo fino el clínker procedente de la calcinación hasta la fusión incipiente de una mezcla íntima en proporciones adecuadas de materiales calcáreos y arcillosos sin más edición que la de yeso.

❖ Composición química del cemento

TABLA 2.3 – 1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

Composición Química del Cemento Portland			
Compuesto	Fórmula Química	Abreviatura Usada	Porcentaje
Silicato Tricálcico	3CaOSiO_2	C_3S	40 – 50 %
Silicato Dicálcico	2CaOSi_2	C_2S	20 – 30 %
Aluminato Tricálcico	$2\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A	10 – 15 %
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	CA_4F	5 – 10 %

Fuente: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com>

❖ Tipos de cemento portland

Debido a la notable evolución de la industria del cemento se puede contar diversos tipos. Generalmente el cemento portland se clasifica de acuerdo a la normalización del país (En Bolivia se usa la Norma NB – 011). Las normas ASTM, clasifica 5 tipos de cementos enumerándolos del I al V, la diferencia en las propiedades en los tipos de cemento depende de la proporción relativa que ellos poseen de los cuatro componentes principales.

La norma también se refiere a cementos tipo I-A, II-A y III-A, que son exactamente los tipos I, II y III, excepto que durante el proceso de pulverización de Clinker se le

adiciona un material incorporador de aire. También existe el cemento tipo I-M que es el mismo tipo I pero con resistencia superior.

Tipo I: Para obras de hormigón en general donde las propiedades especiales de los otros tipos de cementos no son requeridas.

Tipo II: Para uso en construcción de hormigón en general expuestas a la acción de sulfatos o donde se requiere un moderado calor de hidratación.

Tipo III: Cuando se requiera una alta resistencia inicial.

Tipo IV: Para usar cuando requiera bajo los valores de calor de hidratación.

Tipo V: Cuando se requiere una alta resistencia a los sulfatos (alcalinos).

2.3.1 Propiedades del cemento portland

❖ Hidratación y calor de hidratación

Cuando el agua y el cemento reaccionan, se genera calor de hidratación durante los procesos de fraguado y endurecimiento haciéndose importante en estructuras de considerable masa, debido a que si no se disipan rápidamente puede ocurrir un incremento en la temperatura del concreto, produciéndose una rápida evaporización del agua y cambios volumétricos que llevan a la contracción del material y su eventual agrietamiento. Las secciones estructurales delgadas disipan el calor de hidratación difundiéndolo al ambiente; intercambio que se hace más difícil a medida que se engruesa la sección. La cantidad de calor generado durante los primeros siete días para los diferentes tipos de cemento, expresados como porcentaje del total se muestra a continuación:

TABLA 2.3.1 – 1: CALOR GENERADO EN LOS PRIMEROS 7 DÍAS

Cantidades Aproximadas de Calor Generado en los Primeros 7 Días		
Tipo de Cemento	Características	% De Calor Generado
I	Uso General	100
II	Moderada resistencia a los Sulfatos	80 – 85
III	Desarrolla, altas fuerzas iniciales	150
IV	Desarrollo de bajo calor de hidratación	40 – 60
V	Desarrollo de alta resistencia a los Sulfatos	60 - 75

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

❖ **Peso específico**

El peso específico o densidad del cemento es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que ocupa esa masa. En el cemento portland puro, su valor varía entre 3,10 y 3,15 g/cm³, y en el cemento con adiciones suele estar entre 2,90 y 3,0 g/cm³. El valor del peso específico del cemento en realidad no indica la calidad de éste, y su valor es usado principalmente para el diseño de mezclas.

Existe gran variedad de métodos para determinar la densidad del cemento de los cuales se pueden citar los de Le Chatelier, Schumann, Mann, Condlot y otros.

❖ **Superficie específica o finura**

La finura es una propiedad muy importante del cemento y por ello tiene que someterse a un control cuidadoso, especialmente de los fabricantes.

Las partículas de cemento, por ser muy pequeñas, no pueden ser separadas por mallas. Por esta razón, el grado de finura del cemento se mide por otro tipo de métodos y parámetros.

El parámetro de medición de la finura del cemento es el área específica, expresada como el área de la superficie total en cm^2 por gramo de cemento (o m^2 por Kg de cemento).

El área especificada en cm^2/g significa la cantidad de superficie que un gramo de partículas de cemento puede cubrir. Así, un cemento con área específica mayor será más fino que otro con área específica menor.

Un aumento en la finura del cemento tiene los siguientes efectos:

- ✓ Hidratación temprana.
- ✓ Desarrollo rápido de la resistencia a la compresión en el concreto, especialmente a edades mayores o cercanas a los 7 días.

Aun así, moler las partículas del cemento hasta obtener un alto grado de finura presenta ciertas desventajas:

- ✓ Representa un proceso con costos considerables.
- ✓ Las partículas de cemento al ser más finas se deterioran con mayor rapidez por la atmósfera.
- ✓ Experimentan una reacción más fuerte con los agregados reactivos alcalinos.
- ✓ Forman una pasta con mayor contracción y más susceptibilidad de agrietamiento.

❖ **Tiempo de fraguado**

Cuando el cemento se mezcla con el agua, formando de esta manera la pasta, mantiene una plasticidad casi constante durante un tiempo, luego del cual la pasta cambia de estado fluido a estado rígido, que se conoce como fraguado. El lapso que transcurre desde el mezclado hasta dicho cambio se conoce como tiempo de fraguado. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere alguna resistencia, es conveniente diferenciar entre fraguado y endurecimiento, pues este último se refiere al aumento de resistencia de la pasta de cemento fraguada.

Se distingue entre fraguado inicial, que es el lapso entre amasado y la pérdida parcial de plasticidad de la pasta, encontrándose el cemento parcialmente hidratado y fraguado final, que es cuando la pasta deja de ser deformable ante cargas

relativamente pequeñas, con el cemento aún más hidratado. A partir de este momento comienza el endurecimiento de la pasta, proceso que se considera indefinido, aunque para efectos de construcción se estima a los 28 días.

El tiempo de fraguado es importante porque da una idea del tiempo disponible para mezclado, transporte, colocación vibrado y afinado de concretos y morteros, la edad a la cual podrían soportar cargas, así como la de permitir tránsito sobre ellos y la ejecución del tratamiento de curado.

El fraguado inicial debe presentarse a los 45 minutos como mínimo y el final antes de 10 horas para cualquier método (Aguja de Vicat o de Gillmore).

❖ Resistencia

Ésta es la propiedad más importante del cemento endurecido en cuanto a requisitos estructurales y por esto está indicada en todas las especificaciones.

En la mayoría de países del mundo, se mide la resistencia por medio de morteros hechos con materiales específicos y en condiciones muy controladas. Las pruebas de resistencia que existen son las de compresión, tensión y flexión, siendo la primera la más importante puesto que las otras tienen un valor muy pequeño relativo al de compresión.

2.4 Agregados del concreto

En términos generales, los agregados ocupan aproximadamente las tres cuartas partes del volumen de concreto y por lo tanto su calidad es de considerable importancia no solamente desde el punto de vista económico sino también desde otros como la resistencia, durabilidad, trabajabilidad y del comportamiento estructural del hormigón. Los agregados son una masa de materiales casi siempre pétreos, que se consideraban originalmente inertes; pero sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas influyen sobre el comportamiento del hormigón.

Están constituidos por la parte fina (arena) y la parte gruesa (grava o piedra triturada), las cuales pueden provenir de fuentes naturales o artificiales. La arena o agregado fino, es aquella cuyo diámetro varía entre 74μ y 5 mm; y la grava o agregado grueso es aquella cuyo diámetro es superior a 5mm. El material con diámetro menor a 74μ

generalmente es limo o arcilla cuyas partículas tienen ciertas características que interfieren en el proceso de hidratación del cemento y de allí que se consideran perjudiciales para la pasta de hormigón.

❖ Clasificación general

Los agregados comúnmente se clasifican según su procedencia, tamaño, características petrográficas y densidad.

De acuerdo con el origen de los agregados, se pueden clasificar de la siguiente manera:

a) Agregados naturales: son todos aquéllos que provienen de la explotación de fuentes naturales, tales como depósitos de arrastres fluviales (arenas de río) o de glaciares (canto rodado) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Se pueden aprovechar en su granulación natural o triturándolos mecánicamente, según sea el caso, de acuerdo con las especificaciones requeridas.

b) Agregados artificiales: éstos se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, ladrillo triturado, limaduras de hierro y otros. Generalmente son más ligeros o pesados que los naturales. Por su tamaño se clasifican como:

TABLA 2.4-1: CLASIFICACIÓN GENERAL AGREGADOS

Clasificación de los Agregados Según su Tamaño								
Tamaño en mm	> 50,8	50,8-19,1	19,1-4,76	4,76-2,0	2,0-0,42	0,42-0,074	0,074-0,002	<0,002
Denominación	Piedra	Grava	Gravilla	Arena Guesa	Arena Media	Arena Fina	Limo	Arcilla
Denominación	Agregado Grueso			Agregado Fino			Fracción muy fina	
Recomendaciones para Hormigón	Material bueno para producir hormigón			Material bueno para producir hormigón			Material no recomendable	

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

Por su densidad se clasifican como:

TABLA 2.4-2: CLASIFICACIÓN AGREGADOS POR DENSIDAD

Clasificación de los Agregados según su Densidad				
Clasificación del Agregado	Densidad Aproximada		Variedades mas comunes de Agregados	Ejemplo de Uso
	Del Agregado	Del Hormigón		
Liviano	480 - 1300	1350 - 1000	Pizarras expandidas, esquistos, escoria, arcilla	Hormigón liviano estructural
		500 - 1350	Pómez, perlita, diatomita	Hormigón para aislamientos
Normal	1300 - 2000	2000 - 2600	Arena, grava, piedra triturada, clinker, escoria de fundición	Obras de hormigón en general
Pesado	2000 - 5600	> 2600	Barita, limonita, magnetita, limadura de acero, hematita	Hormigón macizo de anclaje para protección contra radiaciones

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

2.4.1 Funciones de los agregados

En estado plástico la arena y la pasta actúan como lubricantes de las partículas más gruesas para que el concreto pueda ser mezclado, transportado, colocado, compactado y terminado en forma adecuada.

La introducción de agregados a la pasta forma una trabazón tal que se genera una superficie de adherencia que disminuye los cambios de volumen y se disminuye el volumen total que puede sufrir contracción.

Aportan parte de la resistencia propia a la resistencia a la compresión característica del concreto.

Los agregados como componentes del hormigón, deben contrarrestar con sus propiedades de durabilidad, agentes nocivos como exposiciones severas a humedad, secado, aguas o suelos agresivos.

2.4.2 Propiedades de los agregados

❖ Granulometría

La distribución de los distintos tamaños de los granos que componen un árido tiene una importancia decisiva en las características del hormigón. El estudio de dicha distribución suele efectuarse mediante la curva granulométrica, que se determina cribando el árido a través de una serie normalizada de cribas y tamices.

Una vez efectuado el cribado del árido, pueden dibujarse su curva granulométrica tomando en abscisas las aberturas de los tamices, y en ordenadas los porcentajes que pasan por cada tamiz. Generalmente se emplean papel semilogarítmico.

El agregado grueso debe estar bien gradado entre los límites fino y grueso y debe llegar a la planta de concreto separado en tamaños normales cuyas granulometrías se indican a continuación:

TABLA 2.4.2 – 1: GRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO SEGÚN ASTM C33

Tamiz U.S. Standard	Dimensión de la malla (mm)	Porcentaje en peso que pasa por los tamices individuales		
		19 mm	38 mm	51 mm
2"	50	-	100	100
1 ½"	38	-	95-100	95-100
1"	25	100	-	35-70
¾"	19	90-100	35-70	-
½"	13	-	-	10-30
⅜"	10	20-55	10-30	-
N° 4	4,8	0-10	0-5	0-5
N° 8	2,4	0-5	-	-

Fuente: Norma ASTM C33

El agregado fino deberá estar bien gradado entre los límites fino y grueso y deberá llegar tener la granulometría siguiente:

TABLA 2.4.2 – 2: GRADACIÓN DEL AGREGADO FINO SEGÚN ASTM C33

Tamiz U.S. Standard	Dimensión de la malla (mm)	Porcentaje en peso que pasa
N° 3/8"	9,52	100
N° 4	4,75	95 - 100
N° 8	2,36	80 - 100
N° 16	1,18	50 - 85
N° 30	0,60	25 - 60
N° 50	0,30	10 - 30
N° 100	0,15	2 - 10

Fuente: Norma ASTM C33

❖ Módulo de finura

Es la caracterización de la composición granulométrica de un árido, según Abrams, que es el número que resulta de sumar los tantos por cientos retenidos en cada uno de los tamices y dividirlos entre cien. Se emplea una serie de tamices denominada serie Tyler, formada por 10 tamices de malla cuadrada, siendo la mayor de 3 pulg. (76,2 mm).

TABLA 2.4.2 – 3: MÓDULO DE FINURA DE LOS AGREGADOS

TAMAÑO	MÓDULO
Grava gruesa	7,5
Grava media	6,7
Grava fina	6,0
Arena gruesa	3,0
Arena media	2,5
Arena fina	1,5

Fuente: Norma ASTM C33

El módulo de finura disminuye a medida que disminuye el tamaño de árido; la determinación del módulo de finura (MF), se práctica según la A.S.T.M., deseando el material a temperatura no superior a 110 °C y pesando cierta cantidad, según se trate de arena o grava y se tamiza con la serie Tayler, se pesa el retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje.

$$MF = [\% \sum \text{Ret. (1 } \frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + N^{\circ}4)] / 100$$

$$MF = [\% \sum \text{Ret. (3/8'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100 + N^{\circ}200)] / 100$$

Se considera que el MF de una arena adecuada para producir hormigón debe estar entre 2,3 y 3,1.

❖ **Tamaño máximo**

Se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra. Como su nombre lo indica, es el tamaño de las partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregados y que en algunos casos puede ser único.

TABLA 2.4.2 – 4: TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO GRUESO

Tamaño máximo	Uso general
51 mm (2")	Estructuras de concreto en masa: muros, losas y pilares de más de 1,0 m de espesor.
38 mm (1 ½")	Muros, losas, vigas, pilares, etc., de 0,30 m a 1,00 m de espesor.
19 mm (¾")	Muros delgados, losas, alcantarillas, etc., de menos de 0,30 m de espesor.

Fuente: Norma ASTM C33

❖ **Tamaño máximo nominal**

Es un parámetro que deriva del análisis granulométrico y está definido como el siguiente tamiz que le sigue en abertura (mayor) a aquél cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

En muchos casos el tamaño máximo y el tamaño máximo nominal pueden no coincidir, lo cual resulta perfectamente lógico debido a que este último indica el

promedio de partículas más grandes en su fracción gruesa, mientras que el tamaño máximo tan solo da una idea de las partículas más grandes que como se mencionó puede ser tan solo una.

❖ **Forma y textura superficial de los agregados**

La forma y textura es otra propiedad que influye en las características del hormigón, las piedras naturales sometidas a trituración tienen forma que varían desde aproximadamente cúbicas a las alargadas y aplanadas y de textura rugosa, mientras que los agregados de río tienen forma redondeada y textura lisa debido al proceso de arrastre a que han sido sometidas.

En cuanto a la forma, se puede decir que la ideal es la redondeada, desde el punto de vista del acomodamiento, se ha demostrado que en un metro cúbico de agregados redondeados sueltos pueden haber hasta un 25% más de material que en igual volumen de material de forma cúbica.

Por otro lado hay que tener cuidado con las partículas conocidas como “lajudas”, dichas partículas que generalmente son débiles porque poseen una estructura laminar, tienden a colocarse en forma horizontal dentro de la masa de hormigón y muchas veces impide la salida del agua evaporable durante el proceso de fraguado, generando bolas de aire lo que origina una disminución de la resistencia. La norma define partícula larga y partícula plana como:

Partícula larga: Aquélla cuya relación entre longitud (L) y ancho (b) es mayor que 1,5

$$P. larga : \frac{L}{b} > 1,5$$

Partícula plana: Aquélla cuya relación entre espesor (e) y ancho (b) es menor que 0,5

$$P. plana : \frac{e}{b} < 0,5$$

La norma especifica que el porcentaje de partículas de forma indeseable (planas o alargadas), no debe exceder del 50% de la masa de agregado, y el porcentaje de forma lajuda no debe exceder a un máximo de 15%.

❖ **Densidad**

Es una propiedad física de los agregados y está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, lo que significa que depende directamente de las características del grano del agregado.

Como generalmente las partículas de agregado tienen poros saturables como no saturables, que dependiendo de su permeabilidad interna pueden estar vacíos, parcialmente saturados o totalmente llenos de agua, se genera una serie de estados de humedad a los que corresponde idéntico número de tipos de densidad, la que más interesa en el diseño de mezclas es la densidad aparente que se define como la relación que existe entre el peso del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos todos los poros (saturables y no saturables). El valor de la densidad de la roca madre normalmente varía entre 2,48 y 2,8 g/cm³.

❖ **Porosidad**

Es otra propiedad física de los agregados, muy importante dentro de la masa de hormigón porque una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta con lo que se afectan desfavorablemente propiedades como la adherencia, resistencia a la compresión y flexión, y además la durabilidad en todos sus aspectos (congelamiento y deshielo, humedecimiento y secado), así como la resistencia al desgaste o abrasión.

❖ **Absorción y humedad de la superficie**

Los agregados pueden tener algún grado de humedad, lo cual está directamente relacionado con la porosidad de las partículas, que a su vez depende del tamaño de los poros, su permeabilidad y la cantidad o volumen total de poros.

Las partículas de agregado pueden pasar por distintos estados de humedad como ser:

Totalmente seco

Se logra mediante un secado al horno a 110°C hasta que los agregados tengan un peso constante.

Parcialmente húmedo

Se logra mediante exposición al aire libre.

Saturado y superficialmente seco

Es un estado límite en el que los agregados tienen todos sus poros llenos de agua pero superficialmente se encuentran secos.

Totalmente Húmedo

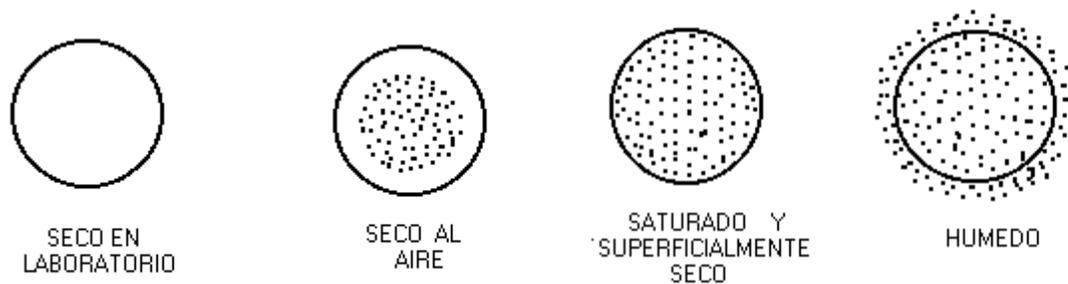
Todos los poros del agregado están llenos de agua y además existe agua libre superficial.

TABLA 2.4.2 – 5: PORCENTAJES DE ABSORCIÓN EN LOS AGREGADOS

Grava empleada Tipo de roca	Peso específico Sat. Y sup. Seca	Absorción %
Arenisca	2,47	5,0
Pizarra	2,75	1,2
Granito	2,67	0,5
Caliza	2,74	0,2
Cuarzo	2,65	0,3

Fuente: Norma ASTM

FIGURA 2.4.2 – 1: CONTENIDOS DE HUMEDAD EN AGREGADOS



❖ Pesos unitarios

Es una propiedad física importante porque indica el grado de acomodamiento de las partículas y entre menor sea éste, menor será el volumen de vacíos entre partículas que hace que la mezcla sea económica, porque habrá menor cantidad de huecos a ser llenados con pasta de cemento. Mientras mayor sea el peso unitario habrá mayor

cantidad de granos, lo cual depende de la granulometría, forma, textura y tamaño de los mismos.

El peso unitario es un factor que mida la aptitud del agregado para ser utilizado en la producción de hormigón y se determina por medio del procedimiento dado en la norma, su valor varía entre 1200 y 1750 kg/m³ para agregados naturales.

Existen dos tipos de pesos unitarios y dependen del grado de compactación del agregado y son:

Peso unitario suelto

Se denomina PUS cuando para determinarlo se coloca el material seco suavemente en el recipiente hasta el punto de derrame y a continuación se nivela.

El concepto de PUS es importante cuando se trata de manejo, transporte y almacenamiento de los agregados.

Peso unitario compactado

Se denomina PUC cuando los granos han sido sometidos a compactación incrementando así el grado de acomodamiento de las partículas de agregado y por tanto el valor de la masa unitaria.

El PUC es importante desde el punto de vista de diseño de mezclas ya que con él se determina el volumen absoluto de los agregados, por cuanto éstos van a ser sometidos a una compactación durante el proceso de colocación del hormigón.

❖ **Resistencia a la compresión**

Normalmente las partículas de agregado tienen una resistencia superior a la pasta endurecida, de tal manera que cuando el agregado falla antes que la pasta, la resistencia del agregado toma importancia.

Las posibles fallas de los granos se deben a que tienen estructura pobre o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (cuando se explota con voladura) o también por un inadecuado proceso de trituración.

❖ Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión, desgaste o dureza de un agregado, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de pisos y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben ser duros, este proceso se realiza por medio de la máquina de Los Ángeles.

2.5 Agua para mezclas de hormigón

El agua es el elemento por medio del cual, el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes, ya que en presencia de ella experimenta reacciones químicas dándole las características de fraguar y endurecer.

El agua se usa en la elaboración de hormigón para propósitos diferentes: Como agua de mezclado, como de agua de curado y como agua de lavado de los agregados. El agua de mezclado forma aproximadamente el 15% del volumen total del concreto, 5% sirve para hidratar el cemento y el 10% restante lubrica el hormigón y luego se evapora durante el proceso de fraguado. El agua de curado se utiliza después de que el hormigón ha fraguado y tiene como función la de seguir hidratando el cemento. El agua de lavado de los agregados no participa activamente en las mezclas pero es importante en el procesamiento de los agregados.

En términos generales, el agua a utilizar tanto en el mezclado como en el curado del concreto debe ser potable y cuando se trata de utilizar aguas cuyo comportamiento es desconocido se hace imprescindible su ensayo y comparación con aguas de reconocidas buenas características.

2.5.1 Agua de mezclado

Es aquélla que se le agrega al cemento para formar la pasta. Tiene como funciones hidratar el cemento y proporcionar una fluidez a la mezcla tal que, con una lubricación adecuada de los agregados, se obtenga la manejabilidad del concreto deseada cuando este se encuentre en estado fresco.

La fluidez de la pasta depende de la cantidad de agua de mezclado, si se aumenta esta cantidad sin modificar el contenido de cemento, la parte de agua de hidratación del cemento permanece constante, incrementándose así la parte de agua evaporable; cierta porción de esta queda atrapada en el interior del hormigón y al producirse la evaporación se forma una serie de conductos capilares que se llenan de aire, generando un concreto endurecido poroso, menos resistente y más permeable.

❖ Características

Cualquier agua natural que sea apta para el consumo humano y no tenga sabor u olor fuerte puede ser usada para la elaboración de hormigón, sin que esto implique que el agua adecuada para la elaboración de la pasta sea potable (como un agua con contenido de azúcares).

Las impurezas que puede haber disueltas en el agua o presentes en forma de suspensiones, tales como azúcar, ácidos, sales, materia vegetal, aceites, sulfatos, etc. pueden interferir con la hidratación del cemento retrasando así el tiempo de fraguado y reduciendo la resistencia del concreto.

2.5.2 Agua de curado

El proceso de hidratación la partícula de cemento no se hidrata totalmente sino que, a medida que entre en contacto con el agua, se va formando una película superficial quedando en el interior una porción sin reaccionar y por tanto inerte. Para que este núcleo reaccione es necesario lograr un abastecimiento adicional de agua durante las etapas tempranas de endurecimiento después del proceso de fraguado y lograr así que el cemento desarrolle todo su potencial aglutinante. A dicho suministro de agua se denomina proceso de curado del concreto, a la que se utiliza para tal fin, agua de curado.

❖ Características

Los requerimientos para el agua de curado son menos exigentes que aquéllos usualmente utilizados para el agua de mezclado, principalmente porque el agua de curado está en contacto con el concreto por un periodo de tiempo relativamente corto.

2.5.3 Calidad del agua

Se presenta un resumen de valores máximos recomendados de concentraciones de impurezas en el agua de mezclado y los ensayos requeridos para la misma.

TABLA 2.5.3-1: ENSAYOS REQUERIDOS PARA EL AGUA DE MEZCLADO

ENSAYOS NORMALMENTE ESPECIFICADOS PARA ANÁLISIS DEL AGUA DE MEZCLADO PARA HORMIGÓN	
TIPOS DE IMPUREZA	NORMA ASTM
Calcio y magnesio	D 511
Cloruros	D 512
Sulfatos	D 516
PH	D 1293
Acidez y alcalinidad	D 1067
Partículas y materia disuelta disuelta en el agua	D 1888
Definición de términos relativos al agua	D 1129

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

TABLA 2.5.3-2: VALORES DE IMPUREZAS EN EL AGUA DE MEZCLADO

VALORES MÁXIMOS RECOMENDADOS DE CONCENTRACIONES DE IMPUREZAS EN EL AGUA DE MEZCLADO PARA HORMIGÓN	
TIPO DE IMPUREZA	Valor Máximo Recomendado
Carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio	1000 ppm
Cloruros	
- Estructuras con bajo potencial de corrosión y condiciones secas	20000 ppm
- Concreto pretensado	500 ppm

- Estructuras con elementos galvanizados y de aluminio	1000 ppm
Sulfato de Sodio	10000 ppm
Carbonato de calcio y magnesio	400 ppm
Cloruro de magnesio	40000 ppm
Cloruro de calcio	30000 ppm
Sales de hierro	40000 ppm
Sulfato de magnesio	25000 ppm
Sales de magnesio, estaño, zinc cobre y plomo	500 ppm
Sulfito de sodio	100 ppm
Agua de mar	
- Para concreto no reforzado	35000 ppm
- Para concreto pretensado o reforzado	No se recomienda
PH	6,0 a 8,0
Ácidos inorgánicos (ácido sulfúrico)	10000 ppm
Hidróxido de sodio (por peso de cemento)	0,50%
Hidróxido de potasio (por peso de cemento)	1,20%
Aguas sanitarias	20 ppm%
Azúcar	500 ppm
Partículas en suspensión	2000 ppm
Aceite mineral (por peso de cemento)	2%
Agua con algas	No se recomienda

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

2.6 Aditivos

Son aquellos materiales distintos al agua, los agregados o el cemento que se utilizan como ingredientes en concretos y morteros, se añaden a la mezcla antes o durante su mezclado.

Características que se pueden mejorar con ayuda de aditivos:

Estado fresco: manejabilidad, consistencia, plasticidad, velocidad de endurecimiento, segregación, exudación.

Estado endurecido: resistencia a compresión, resistencia a flexión, resistencia a tensión, durabilidad, permeabilidad, humedecimiento-secado, congelamiento y deshielo.

2.7 Dosificación de hormigones

Un buen hormigón es aquel que resulta satisfactorio tanto en sus estados: Fresco y endurecido.

Las condiciones relativas al estado fresco residen en que el grado de humedad de la mezcla sea el adecuado para que el hormigón pueda ser transportado, se pueda compactar por medios apropiados con el mínimo de energía posible, y además tenga cohesión suficiente, según el método de colocación utilizado, para que no se produzca segregación o exudación.

Un buen hormigón en estado endurecido debe tener una resistencia a la compresión satisfactoria y una durabilidad adecuada. Por lo común la resistencia es el factor más importante, pero esta característica va encaminada no sólo a soportar un esfuerzo a la compresión prescrita, sino también garantizar otras propiedades en el concreto que están directamente relacionadas con una alta resistencia. Por otro lado es necesario que el hormigón sea durable, es decir, que resista sin sufrir deterioro con el tiempo, las condiciones para las cuales se ha proyectado.

❖ Clasificación del hormigón

a) Densidad

Hormigón de peso liviano: Aquél cuyo peso unitario es menor que 2000 kg/m^3 .

Hormigón de peso normal: Aquél cuyo peso unitario está entre 2000 kg/m^3 y 2600 kg/m^3 .

Hormigón pesado: Aquél cuyo peso unitario es mayor que 2600 kg/m^3 .

b) Consistencia

Es una medida indirecta de la trabajabilidad de una mezcla de hormigón y se mide por medio del ensayo de asentamiento.

TABLA 2.7-1: CLASIFICACIÓN DEL HORMIGÓN POR SU CONSISTENCIA

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de Concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipo de Estructura y Colocación
0 - 2,0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de encofrados.
2,0 - 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados y construidos con máquina extrusora.
3,5 - 5,0	Semi - seca	Pequeño	Construcción en masa voluminosa, losas medianamente reforzadas con vibración, fundaciones en concreto simple, pavimentos con vibradores normales.
5,0 - 10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas, pavimentos, compactados a mano, columnas vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10,0 - 15,0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo, trabajos donde la colocación sea difícil, revestimiento de túneles, no recomendable para compactarlo demasiado.

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

c) Resistencia

De acuerdo al Código Boliviano de Hormigón (CBH – 87), los hormigones se tipifican, de acuerdo con su resistencia de proyecto a compresión, a los 28 días, en probetas cilíndricas normales, según la siguiente serie:

H12,5; H15; H17,5; H20; H25; H30; H35; H40; H45; H50; H55

Donde las cifras correspondientes a las resistencias de proyecto, f_{ck} , en MPa.

El ingeniero Vitervo O'Reilly, hace una referencia a la clasificación de hormigones por su resistencia a la compresión a los 28 días de la siguiente manera:

Hormigón normal: Aquél con una resistencia entre 140 kg/cm^2 (2000 psi) y 350 kg/cm^2 (5000 psi).

Hormigón de alta resistencia: Aquél con una resistencia entre 350 kg/cm^2 (5000 psi) y 1000 kg/cm^2 (14000 psi).

Hormigón de ultra alta resistencia: Aquél con una resistencia superior a 1000 kg/cm^2 (14000 psi).

2.7.1 Hormigón fresco

❖ Trabajabilidad o manejabilidad

Se define como el grado de facilidad o dificultad con que el concreto puede ser mezclado, manejado, transportado, colocado y terminado sin que pierda su homogeneidad. De ahí que se puede notar que la trabajabilidad puede ser considerada como una combinación de varias propiedades:

- La compactabilidad, se refiere a la facilidad con la que el aire atrapado en la mezcla puede ser expulsado.
- La movilidad, es la facilidad con la que el hormigón puede fluir alrededor del acero de refuerzo, dentro de las formaletas, encofrado, etc.
- La cohesividad, es la resistencia de una mezcla de hormigón a la segregación y/o exudación.
- La consistencia, se refiere al estado de fluidez, o sea, al grado de humedad de la mezcla, es decir, que tan seca o fluida es una mezcla de hormigón.
- La plasticidad, es la propiedad del hormigón que le permite ser fácilmente moldeado, y que a la vez puede cambiar de forma lentamente si se saca del molde en estado fresco.

Los factores que influyen en la trabajabilidad son:

- a) Gradación de los agregados
- b) Forma y textura superficial de los agregados
- c) Contenido de aire
- d) Contenido de aditivos
- e) Fluidez de la pasta

- f) Cantidades relativas de pasta y agregados
- g) Relación arena – agregado total
- h) Factores externos

Como no existe una forma directa de medir esta propiedad, se han desarrollado ensayos que permiten hacer una correlación entre la manejabilidad con otra característica, el ensayo más conveniente y utilizado es el de asentamiento, el cual mide con bastante aproximación la consistencia o grado de humedad de una mezcla.

❖ **Segregación del concreto**

Es la separación de sus constituyentes por falta de cohesividad, de manera que su distribución deja de ser uniforme.

Las principales causas de segregación en el concreto son la diferencia en tamaño de las partículas, la densidad de los constituyentes de la mezcla y una mala gradación de los agregados. Asimismo, pueden influir otros factores como un mal mezclado, un adecuado sistema de transporte, una colocación deficiente y un exceso de vibración en la compactación.

Se puede presentar de dos formas. La primera ocurre cuando se usan mezclas pobres y demasiado secas, de tal manera que las partículas gruesas tienden a separarse, bien sea porque se desplazan a lo largo de una pendiente o porque se asientan más que las partículas finas. El segundo tipo ocurre particularmente en mezclas húmedas, y se manifiesta por la separación de una parte de la pasta de los agregados.

❖ **Exudación o sangrado del hormigón**

Se considera como una forma de segregación, en la que una parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie de una mezcla recién colada. Esto se debe a que los constituyentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua cuando se asientan durante el proceso de fraguado.

La exudación de la mezcla trae consecuencias nocivas. Por un lado la parte superior de una porción de hormigón se vuelve demasiado húmeda, lo que conlleva a estructuras porosas, débiles y poco durables. Por otra parte, si la evaporación de agua

en la superficie del concreto es más rápido que la velocidad de exudación, se producen fisuras plásticas de contracción.

Otro problema que se genera con la elevación del agua es que se puede quedar atrapado debajo de las partículas gruesas de agregado o del acero de refuerzo, lo que genera zonas de baja adherencia y por lo tanto una eventual disminución en la resistencia. Adicionalmente, el agua dejada tras de sí conductos capilares que incrementan la permeabilidad de la masa de concreto.

❖ **Proceso de fraguado y endurecimiento**

En general, el hormigón fresco debe permanecer lo suficientemente plástico durante un tiempo, por lo menos media hora y preferiblemente una hora, para que pueda ser manejado y consolidado convenientemente. Después de este tiempo, y dejada la mezcla en reposo, comienza el proceso de endurecimiento normal hasta que se dice que “ha fraguado”. Sin embargo, bajo condiciones normales y pasadas varias horas del primer mezclado, el concreto que ha endurecido considerablemente puede ser replastificado y consolidado por vibración o remezclado. Es conveniente definir el punto en el cual el concreto fragua o pasa de estado plástico al estado endurecido.

2.7.2 Concreto endurecido

❖ **Resistencia**

Es la propiedad más importante del hormigón, porque influye en forma directa en las demás características de significado práctico. En general, los concretos más resistentes son más densos, menos permeables, y más resistentes al interperismo y ciertos agentes destructivos; pero por otro lado exhiben mayor contracción por fraguado y menor extensibilidad, por lo tanto son más propensos al agrietamiento.

La resistencia del hormigón es una habilidad para resistir esfuerzos y de allí que se puede considerar de cuatro maneras: compresión, tracción, flexión y corte, como el hormigón presenta una alta resistencia a la compresión simple, se estudian las demás propiedades a partir de ésta.

La resistencia a la compresión especificada a los 28 días, para un tipo individual de hormigón, es la resistencia que se espera sea igualada o sobrepasada.

Los factores que inciden en la resistencia del hormigón son:

- a) Tipo y cantidad de cemento
- b) Relación agua / cemento
- c) Características de los agregados
- d) Agua
- e) Influencia del fraguado del hormigón
- f) Curado del hormigón
- g) Influencia de la edad del hormigón

TABLA 2.7.2-1: INCREMENTO DE LA RESISTENCIA DEL
HORMIGÓN CON
RESPECTO AL TIEMPO

INCREMENTO APROXIMADO PROMEDIO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGON CON EL TIEMPO	
EDAD (DIAS)	% RESISTENCIA CON RESPECTO A LA DE 28 DIAS
1	12
3	40
7	70
14	90
28	100
56	110
90	120
180	125

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

La resistencia a las edades de 7 y 28 días se pueden relacionar mediante la fórmula que se muestra a continuación, teniendo en cuenta que es una relación aproximada ya que a edades tempranas influyen notablemente las propiedades del cemento, la relación agua/cemento, la temperatura, la humedad, los aditivos, etc.:

$$Resis. 28 = a + b * Resist. 7 (kg/cm^2)$$

Siendo a y b constantes que dependen de los factores anteriormente mencionados.

❖ Medida de la resistencia

En términos generales, la gran mayoría de estructuras de concreto son diseñadas bajo la suposición de que el concreto resiste únicamente esfuerzos de compresión; por consiguiente, para propósitos de diseño estructural, la resistencia a la compresión es el criterio de calidad, y de allí que los esfuerzos de trabajo estén prescritos por los códigos en términos de porcentajes de la resistencia a la compresión.

La medida de la resistencia a la compresión se efectúa por medio de pruebas estandarizadas, con una prensa que aplica carga sobre la superficie de una probeta cilíndrica de hormigón a una velocidad especificada mientras ocurre la falla, la operación ocurre entre 2 y 3 minutos y se registra la carga a la que la probeta falla. La resistencia a la compresión también se puede medir con muestras cúbicas o prismáticas.

2.7.3 Dosificación

El objetivo de la dosificación de hormigones es determinar las proporciones en que deben combinarse los materiales componentes, de manera de obtener las condiciones previstas para el hormigón.

Estas proporciones son particulares de cada obra o parte de obra, pero generalmente corresponden a las que se señalan en el siguiente cuadro:

TABLA 2.7.3-1: CONDICIONES PARA DOSIFICACIÓN

Tipo De Condición	Características Relacionadas	Parámetros Condicionantes
Condiciones de diseño	Resistencia	Tipo de cemento Razón agua/cemento
Condiciones de uso en obra	Docilidad Fluidez Consistencia Características elemento	Dosis de agua Granulometría Tamaño máximo
Condiciones de	Condiciones ambientales	Tipo de cemento

durabilidad	Ataques agresivos	Uso aditivos Dosis mínima cemento
-------------	-------------------	--------------------------------------

Fuente: Universidad Católica de Chile - Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción

<http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/dosifT6.htm>

❖ **Determinación de las condiciones de partida de la dosificación**

Las dos primeras de estas condiciones deben ser definidas por el usuario de acuerdo a las características de la obra, en base a las siguientes premisas:

a) Tipo de cemento: Queda definido básicamente por la existencia de un ambiente que pueda generar acciones agresivas sobre el hormigón. Eventualmente puede ser necesario considerar la elección de un cemento alta resistencia, si las condiciones de obra requieran de resistencias iniciales más elevadas que las que puede otorgar un cemento corriente.

b) Uso de aditivos: Para el uso eventual de aditivos deben considerarse los principios establecidos para su uso.

2.8 Metodología y procedimientos para la investigación

2.8.1 Dosificación de la mezcla de hormigón método ACI 211

La dosificación de mezclas de hormigón, es la determinación de la combinación más económica y práctica de los agregados disponibles, cemento y agua, que producirá una mezcla con un endurecimiento adecuado. El procedimiento más práctico es determinar la mezcla y hacer correcciones necesarias en obra.

La dosificación de la mezcla de prueba, puede complementarse efectivamente con ensayos de laboratorio de los materiales relacionados con el hormigón.

El objetivo general de este proyecto es el de determinar la preparación óptima de estos hormigones, para diferentes requerimientos y comparaciones.

A continuación se explica la metodología de dosificación para hormigones presentada por el comité ACI – 211, asimismo, se debe tomar en cuenta que un diseño, en el

sentido estricto de la palabra, no es posible, debido a que los materiales son esencialmente variables y muchas de sus propiedades no pueden ser estimadas con exactitud en forma cuantitativa.

El método a emplearse en la dosificación es ACI 211.

❖ Selección de la resistencia del hormigón f_{ck} y f_{cm}

La resistencia característica es un dato de partida a la hora de diseñar la mezcla, viene determinado por el proyectista de la obra, y si no se dice nada en contra, se entiende que es la resistencia característica, que se define, como aquel valor de la resistencia que tiene el 95% de probabilidades de ser superada.

El ACI – 318 indica que el hormigón debe diseñarse y producirse para asegurar una resistencia a la compresión promedio (f_{cm}) lo suficientemente alta para minimizar la frecuencia de los resultados de pruebas de resistencia por debajo del valor de la resistencia a la compresión especificada del hormigón o resistencia característica.

Si no hay registros de pruebas de resistencia en donde se usaron materiales y condiciones similares a aquellas que serán empleadas, la resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en kg/cm^2 se debe determinar de acuerdo:

TABLA 2.8.1-1: RESISTENCIA DE DISEÑO f_{cm}

Resistencia de Diseño Cuando no Hay Datos que Permitan Determinar la Desviación Estándar (a)	
Resistencia específica f_{ck} en (kg/cm^2)	Resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en (kg/cm^2)
Menos de 210 kg/cm^2	$f_{ck} + 70 \text{ kg/cm}^2$
De 210 a 350 kg/cm^2	$f_{ck} + 85 \text{ kg/cm}^2$
Más de 350 kg/cm^2	$f_{ck} + 100 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: Código ACI 211

❖ Selección del asentamiento

Las primeras consideraciones que se deben tomar en cuenta para especificar una consistencia determinada en el concreto fresco, son el tamaño de la sección que se va construir y la cantidad y espaciado del acero de refuerzo.

El segundo aspecto que se debe considerar son las condiciones de colocación, ya que hoy en día existen múltiples sistemas de vaciado que requieren de una mayor o menor plasticidad de la mezcla, lo cual, como es sabido, depende en gran parte del contenido de finos.

El tercer aspecto es el sistema de compactación debido a que la máxima resistencia se logra cuando la masa unitaria del hormigón es máxima.

Los valores de asentamiento indicados en esta tabla se aplican cuando el concreto va a ser consolidado por vibración. Si se emplean otros medios de compactación diferentes a la vibración mecánica, los datos de esta tabla se deben aumentar en 2,5 cm (1"). Como regla general y por razones de economía el menor asentamiento que permita una adecuada colocación es el que debe ser seleccionado.

TABLA 2.8.1-2: ASENTAMIENTOS RECOMENDADOS

Fuente: Código ACI 211

Asentamientos Recomendados para Diversos Tipos de Construcción y Sistemas de Colocación y Compactación				
Consistencia	Asentamiento mm.	Ejemplo de Tipo de construcción	Sistema De colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa

Semi - seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en homigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Elementos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (Normalmente no adecuados para vibrarse)

❖ **Selección del tamaño máximo del agregado**

De acuerdo con el criterio del ACI – 211, los agregados bien graduados de tamaño máximo tienen menos vacíos que los de tamaños menores. He aquí que los concretos con agregado de mayor tamaño requieran menos mortero por unidad de volumen de concreto.

Por lo tanto, el tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura.

En relación con la geometría y el refuerzo de las estructuras, el tamaño máximo del agregado se selecciona de acuerdo con la estrechez de los espacios por los que debe desplazarse el hormigón durante su colocación, de modo que el agregado grueso no sufra obstrucciones y pueda distribuirse uniformemente en todas direcciones. Para ello, deben considerarse aspectos tales como lo angosto de las secciones y las distancias mínimas entre varillas del refuerzo y entre éstas el recubrimiento.

A continuación se dan algunas consideraciones para adoptar el tamaño máximo del agregado:

TABLA 2.8.1-3: TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO

Tamaños máximos nominales de agregados según el tipo de construcción				
Dimensión mínima de la sección (cm)	Tamaño máximo en pulg. (mm.)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 - 15	1/2"(12) - 3/4"(19)	3/4"(19)	3/4"(19) - 1"(25)	3/4"(19) - 1 3/4"(38)
19 - 29	3/4"(19) - 1 1/2"(38)	1 1/2"(38)	1 1/2"(38)	1 1/2"(38) - 3"(76)
30 - 74	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76)	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76)
75 o más	1 1/2"(38) - 3"(76)	6"(152)	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76) - 6"(152)

Fuente: Código ACI 211

❖ Estimación del agua de mezclado y el contenido de aire

Como se mencionó anteriormente el agua de mezclado cumple dos funciones principales en una mezcla de hormigón, una es hidratar las partículas de cemento, y la otra, producir la fluidez necesaria.

La cantidad de agua por volumen de concreto requerida para producir un revenimiento dado depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula y de la granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incluido. Estas estimaciones están proporcionadas por tablas.

TABLA 2.8.1-4: CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO PARA AGREGADOS DE CANTO RODADO Y SIN INCLUSIÓN DE AIRE

Requerimiento Aproximado de Agua de Mezclado para Diferentes Asentamientos y Tamaños Máximos de Agregado, con Partículas de Forma Redondeada y Textura Lisa, en Hormigón sin Aire Incluido									
Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9,51 3/8"	12,70 1/2"	19,00 3/4"	25,40 1"	38,10 1 1/2"	50,80 2"	64,00 2 1/2"	76,10 3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	146
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

Fuente: Código ACI 211

TABLA 2.8.1-5: CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO PARA AGREGADOS DE TRITURACIÓN Y SIN INCLUSIÓN DE AIRE

Requerimiento Aproximado de Agua de Mezclado para Diferentes Asentamientos y Tamaños Máximos de Agregado, con Partículas de Forma Angular y Textura Rugosa, en Hormigón sin Aire Incluido									
Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9,51 3/8"	12,70 1/2"	19,00 3/4"	25,40 1"	38,10 1 1/2"	50,80 2"	64,00 2 1/2"	76,10 3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	15	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: Código ACI 211

TABLA 2.8.1-6: CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO PARA AGREGADOS DE CANTO RODADO Y CON INCLUSIÓN DE AIRE

Requerimiento Aproximado de Agua de Mezclado para Diferentes Asentamientos y Tamaños Máximos de Agregado, con Partículas de Forma Redondeada y Textura Lisa, en Hormigón con aire Incluido									
Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9,51 3/8"	12,70 1/2"	19,00 3/4"	25,40 1"	38,10 1 1/2"	50,80 2"	64,00 2 1/2"	76,10 3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	188	161	151	134	129	121	119	113
25	1	193	167	157	141	135	127	124	117
50	2	197	172	163	147	140	131	128	122
75	3	200	176	167	152	145	135	132	125
100	4	203	179	169	155	148	137	134	128
125	5	205	183	172	158	151	140	137	130
150	6	208	188	176	162	155	144	141	134
175	7	213	194	181	167	161	150	146	139
200	8	219	201	196	174	167	156	152	144

Fuente: Código ACI 211

TABLA 2.8.1-7: CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO PARA AGREGADOS DE TRITURACIÓN Y CON INCLUSIÓN DE AIRE

Requerimiento Aproximado de Agua de Mezclado para Diferentes Asentamientos y Tamaños Máximos de Agregado, con Partículas de Forma Angular y Textura Rugosa, en Hormigón con Aire Incluido									
Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9,51 3/8"	12,70 1/2"	19,00 3/4"	25,40 1"	38,10 1 1/2"	50,80 2"	64,00 2 1/2"	76,10 3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	198	176	166	152	143	132	130	122
25	1	206	183	174	158	149	138	136	128
50	2	211	189	179	164	155	144	142	134
75	3	216	193	183	169	159	149	146	138
100	4	219	196	186	172	163	152	150	141
125	5	222	200	190	176	167	156	153	144
150	6	226	205	194	180	171	161	157	148
175	7	230	210	199	185	177	166	162	153
200	8	235	215	204	190	182	177	169	158

Fuente: Código ACI 211

❖ Selección de la relación agua – cemento

Debido a que la resistencia del hormigón se rige principalmente por la resistencia e interacción de sus fases constituyentes: pasta, agregado e interfaces de adherencia pasta – agregados y cementos produzcan resistencias distintas con la misma relación agua/cemento. Por esta razón, es importante conocer o desarrollar la correspondencia entre la resistencia y la relación agua/cemento, para cada grupo de materiales en particular y para diferentes edades (por ejemplo 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días).

Estos se determinan no sólo por los requerimientos de resistencia sino por factores como la durabilidad y las propiedades del acabado, ya que en diferentes agregados y cementos generalmente producen resistencias distintas con la misma relación agua cemento.

Es altamente recomendable conocer o desarrollar la correspondencia entre la resistencia y la relación agua cemento para los materiales a usarse, en ausencia de tal información se toman valores aproximados y relativamente conservadores para concreto, conteniendo Cemento Portland Tipo I que se indica en tablas.

Por otra parte, la relación agua/cemento no sólo determina los requisitos de resistencia, sino también factores pertinentes a la durabilidad y propiedades para el acabado del

hormigón, debido a que éste debe ser capaz de soportar aquellas exposiciones que puedan despojarlo de su capacidad de servicio, tales como: congelación y deshielo, humedecimiento y secado, calentamiento y enfriamiento, agentes anticongelantes, resistencia a la abrasión y sustancias químicas agresivas, entre otros.

TABLA 2.8.1-8: RELACIÓN AGUA/CEMENTO EN HORMIGONES SIN AIRE INCLUIDO

Correspondencia entre la Resistencia a la Compresión a los 28 Días de Edad y la Relación Agua-Cemento para los Cementos Colombianos, Pórtland Tipo I, en Hormigones sin Aire Incluido			
Resistencia a la compresión Kg/cm²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0,72	0,65
175	-	0,65	0,58
210	0,7	0,58	0,53
245	0,64	0,53	0,49
280	0,59	0,48	0,45
315	0,54	0,44	0,42
350	0,49	0,40	0,38

Fuente: Código ACI 211

TABLA 2.8.1-9: RELACIÓN AGUA/CEMENTO EN HORMIGONES SIN AIRE INCLUIDO

Correspondencia Entre la Resistencia a la Compresión a los 28 Días de Edad y la Relación Agua-Cemento para los Cementos Colombianos, Pórtland Tipo I, en Hormigones con Aire Incluido			
Resistencia a la compresión Kg/cm²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0,65	0,58
175	-	0,59	0,52
210	0,65	0,54	0,49
245	0,61	0,50	0,46
280	0,55	0,44	0,41
315	0,51	0,41	0,39
350	0,46	0,37	0,36

Fuente: Código ACI 211

❖ Cálculo del contenido de cemento

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones efectuadas en los pasos 2.9.1.4 y 2.9.1.5.

El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado (2.9.1.4), dividido entre la relación “agua/cemento” (2.9.1.5). No obstante la especificación incluye por separado un límite mínimo de cemento además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en aquel criterio que conduzca a la mayor cantidad de cemento.

$$C=A/(A/C)$$

Donde:

C = Contenido de cemento en kg/m³.

A = Requerimiento de agua de mezclado en kg/m³.

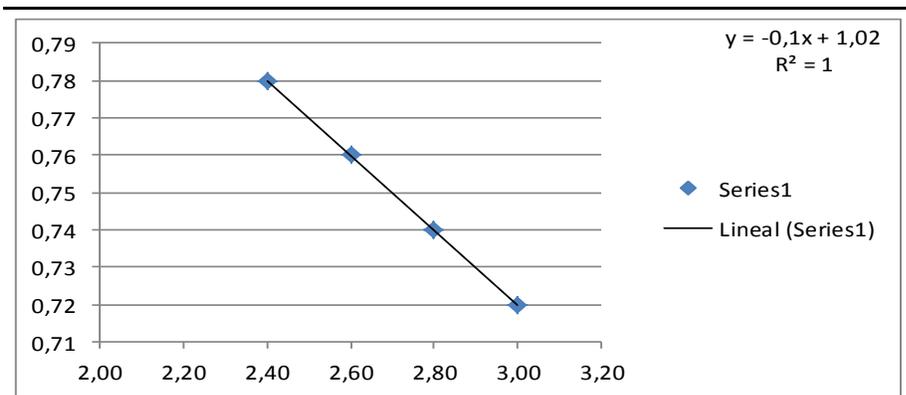
A/C = Relación agua/cemento, por peso.

❖ Estimación del contenido de agregado grueso

Los agregados similares en granulometría y en tamaño máximo producirán un concreto de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplee un volumen determinado de agregado grueso y seco, compactado con varilla por volumen unitario de concreto.

TABLA 2.8.1-10: ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena (b)					
Tamaño máximo		Módulo de finura de la arena			
mm.	pulg.	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	3/8"	0,50	0,48	0,46	0,44
12,7	1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
19,0	3/4"	0,66	0,64	0,62	0,60
25,4	1"	0,71	0,69	0,67	0,65
38,1	1 1/2"	0,75	0,73	0,71	0,69
50,8	2"	0,78	0,76	0,74	0,72
76,1	3"	0,82	0,80	0,78	0,76
152,0	6"	0,87	0,85	0,83	0,81



Fuente: Código ACI 211

❖ Estimación del contenido de agregado fino

Si el peso del volumen unitario de concreto se presupone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido de agregado fino es simplemente la diferencia entre el peso del concreto fresco y el peso total de los otros ingredientes. Por lo general, sobre la base de experiencias anteriores con materiales, se conoce el peso unitario del concreto con una precisión razonable, si no se cuenta con esta información se puede utilizar datos tabulados.

TABLA 2.8.1-11: VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS INGREDIENTES DE HORMIGÓN

Peso Seco y Volumen Absoluto de los Ingredientes por Metro Cúbico de Hormigón			
Componente	Peso seco	Peso	Volumen
Cemento	P_c	G_c	V_c
Agua	P_a	1.0	V_a
Contenido de aire	-	-	A
Agregado grueso	P_{ag}	G_{ag}	V_{ag}
Agregado fino	P_{af}	G_{af}	V_{af}
TOTAL	P_u		1.000

Fuente: Código ACI 211

❖ **Ajustes a las mezclas de prueba**

En la obra es común que por las condiciones de los agregados es posible que la cantidad de agua calculada sea demasiado o por lo contrario sea poco. En tales casos debe realizarse una corrección en las proporciones calculadas.

2.8.2 Criterios y metodología para la dosificación del hormigón con Fibras de Caucho

Como se sabe, para el hormigón con Fibras de Caucho no existe una metodología, una normativa o una guía específica a seguir, para basándose en la misma se pueda conseguir una correcta dosificación, es por eso que este análisis se vuelve comparativo y parte de una mezcla del hormigón patrón.

Sólo se cuenta con algunos elementos datos y criterios a través de los cuales, y con algunos criterios recogidos en los ensayos de laboratorio, se realizará una dosificación de mezclas de prueba que permitan llegar a los valores óptimos que se plantean, en lo que se refiere a características físicas y mecánicas, como así también en la calidad del hormigón en lo que se refiere a su resistencia y permeabilidad.

❖ **Criterios considerados en los materiales**

a) Cemento

A diferencia del hormigón convencional, el contenido total de pasta en el concreto permeable es menor que el contenido de vacíos en los agregados.

El Cemento que se utilizará para la realización de los ensayos es el Cemento Portland de El Puente tipo IP – 30, dicho producto cumple las especificaciones Técnicas de la Norma Boliviana NB – 011, y es apto para la elaboración de hormigones.

Es un producto obtenido de la molienda conjunta de Clinker, yeso y puzolana.

Desprende menor calor de hidratación, lo que reduce la retracción térmica debido a la inclusión de puzolana.

Tiene mayor trabajabilidad en morteros y revestimientos.

La presentación viene en bolsas de 50 Kg.

b) Agregado grueso

El agregado a utilizar será duro, lavado, redondeado y de forma cúbica, no debiendo tener arcillas, arenas ni carbonillas.

Mientras se cumplan las especificaciones procedentes podrá utilizarse tanto agregados ordinarios (pesados), como agregados livianos, lográndose una mayor disminución del peso específico del hormigón que se elabora.

El Agregado Grueso a utilizar en los ensayos de laboratorio es grava procedente del Banco del Río Guadalquivir zona San Blas y sus propiedades físicas y mecánicas obtenidas en laboratorio se presentaran en el capítulo siguiente, sin embargo se puede definir de la siguiente manera: Arenisca micácea con matriz arcillosa, contenido mínimo de materia ferrosa y dureza 5 en la escala de Mohs y consolidación por contacto.

c) Agregado fino

El tipo de agregado a utilizar será lavado, redondeado y forma cubica, no debiendo contener limos o arcillas que perjudiquen la hidratación de la pasta de cemento.

El Agregado Fino a utilizar en los ensayos de laboratorio es arena procedente del Banco del Río Guadalquivir zona San Blas y sus propiedades físicas y mecánicas obtenidas en laboratorio se presentaran en el capítulo siguiente, sin embargo se puede definir de la siguiente manera: Arena silícica de origen conglomerante, con fragmentos de cuarcita, lutita y cristales de cuarzo.

d) Fibras de Caucho

Es un material obtenido del recauchutado de las gomas usadas e inservibles de los autos, camiones, motocicletas, inclusive hasta de bicicletas, y de cualquier elemento que posea caucho en su estructura para su funcionamiento.

Las fibras de caucho se fabrican a partir de la trituración de esta materia prima la cual se la realiza en trituradoras de caucho que se pueden encontrar en ciudades grandes de nuestro país como Cochabamba, La Paz y Santa Cruz.

e) Agua

La cantidad de agua en este tipo de hormigón es importante puesto que demasiada agua en la mezcla puede causar que los poros colapsen, y el agregado se lave, mientras que una cantidad inadecuada de agua impide un curado adecuado y ello puede llevar

a una falla prematura de la superficie por una apreciable disminución de las adherencias. Por lo que el agua a utilizar será la mínima necesaria para recubrir cada elemento de agregado con una fina película de lechada de cemento.

Para tal efecto se utilizará el agua potable de la Zona del Tejar, cuyas características se describen a continuación:

TABLA 2.8.2-1: ANÁLISIS DEL AGUA POTABLE EN LA CIUDAD

Análisis Físico Químico del Agua Potable en la Ciudad de Tarija		
Parámetro de Análisis	Resultados	Unidades
Aspecto	Limpia Cristalina	
Olor	Inodoro	
PH	6,08	
Sólido Total	33	mg/l
Calcio	1	mg/l
Cloruro	7,9	mg/l
Magnesio	2,8	mg/l
Impureza Total	3,8	mg/l
Alcalinidad Total	13,2	mg/l
Índice de Langelier	-1,95	No Corrosiva

Fuente: COSSALT Ltda.

❖ Criterios considerados en la elaboración y colocado

La dosificación a utilizar corresponderá a la de un hormigón tipo A (210 kg/cm^2) que se considerará como hormigón patrón, y se adherirá a la mezcla las fibras de caucho de manera porcentual para así realizar las comparaciones necesarias de diferentes maneras siempre tomando en cuenta y partiendo de la dosificación del hormigón patrón.

Una vez determinada la dosificación más conveniente para preparar la masa de hormigón, hay que medir los materiales. El agua se mide en volumen; el cemento y los agregados en peso; si bien estos últimos pueden dosificarse también en volumen para obras de poca importancia.

En este caso la dosificación será realizada en peso; pero dado el caso que se utilizará un agregado diferente para reemplazar a uno normal y además que de acuerdo a

ensayos de laboratorio a realizar se demostrará la diferencia de pesos específicos, es por eso que dicho reemplazo se realizará en volumen a fin de no alterar las proporciones de la dosificación del hormigón patrón. El hormigón debe amasarse en hormigonera, siendo conveniente, por razones de homogeneidad, verter los materiales en el orden siguiente:

- Una parte de la dosis de agua (aproximadamente la mitad)
- El cemento y la arena simultáneamente
- El agregado grueso (grava)
- Fibras de Caucho
- El resto del agua

La duración del amasado debe ser la necesaria para conseguir una mezcla íntima y homogénea de los distintos componentes, debiendo resultar el agregado bien cubierto por la pasta de cemento. Ello requiere en general un tiempo de amasado del orden del minuto y medio; como mínimo.

Algunos tiempos de mezclado recomendados se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 2.8.2-2: TIEMPOS DE MEZCLADO RECOMENDADOS

TIEMPOS MÍNIMOS DE MEZCLADO RECOMENDADOS	
CAPACIDAD DE LA MEZCLADORA EN M³	TIEMPO DE MEZCLADO EN MINUTOS
0,8	1
1,5	1 1/4
2,3	1 1/2
3,1	1 3/4
3,8	2
4,6	2 1/4
7,6	3 1/4

Fuente: Tecnología del Hormigón (Vitervo O'Reilly)

El transporte del hormigón desde la mezcladora hasta el lugar de colocación, puede hacerse por múltiples procedimientos, entre los que pueden citarse las carretillas, baldes, camiones, canaletas, cintas transportadoras, tuberías y otros.

Cualesquiera sean las formas de transporte, deben cumplirse las condiciones siguientes:

1. No debe transcurrir mucho tiempo entre el amasado y la puesta en obra del hormigón. Generalmente dicho intervalo no será superior de una hora cuando se empleen cementos portland comunes.
2. Durante el transporte no deben segregarse los áridos gruesos, lo que provocaría en el hormigón pérdidas de homogeneidad y resistencia. La resistencia y choques favorecen siempre a la segregación, por lo que a veces será necesario prever una suspensión especial en los vehículos de transporte.
3. Debe evitarse en lo posible que el hormigón seque durante el transporte.
4. Como características de la masa del principio al final de cada descarga de la amasadora, no es conveniente dividir una misma amasada en distintos recipientes para su transporte.
5. Si al llegar al lugar de colocación, el hormigón acusa un principio de fraguado, la masa debe desecharse y no ser puesta en obra.

El vertido y colocación del hormigón deben efectuarse de manera que no se produzca la disgregación de la mezcla. El peligro de la disgregación es mayor, en general, cuanto más grueso es el agregado y más discontinua su granulometría, siendo sus consecuencias peores cuanto menor es la sección del elemento que se hormigona. Se tienen las siguientes recomendaciones:

- a) El vertido no debe efectuarse de gran altura (uno o dos metros como máximo en caída libre), procurando que su dirección sea vertical y evitando desplazamientos horizontales de la masa.
- b) La colocación se efectuará por capas de espesor inferior al que permita una buena compactación de la masa (en general, de 20 a 30 cm sin superar los 40 cm cuando se trate de hormigón en masa, ni lo 60 cm en hormigón armado).
- c) No se arrojará el hormigón con pala a gran distancia, ni se distribuirá con rastrillos para no disgregarlo.
- d) En las piezas muy armadas y, en general, cuando las condiciones de colocación son difíciles, puede ser conveniente para evitar cangrejas y falta de adherencia con las armaduras, colocar primero una capa de hormigón pobre de 2 o 3 cm para verter luego el hormigón normal.

❖ **Criterios considerados en el curado del hormigón**

El desarrollo potencial de resistencias del hormigón y su durabilidad se producen gracias a la reacción química del agua con el cemento; por lo tanto será necesario proteger el hormigón durante el tiempo necesario para que adquiriera las resistencias requeridas en condiciones de humedad y temperatura en un proceso continuo que se denomina curado.

Relacionando lo expuesto anteriormente, hay tres condiciones básicas:

- Los hormigones deben estar suficientemente húmedos para garantizar la hidratación del cemento, en lo posible que esté saturado (100 % de humedad) o cerca de ello, ya que sólo así evitaremos pérdida de humedad de la superficie del hormigón por evaporación.
- Una temperatura adecuada que le permitirá una buena hidratación del cemento. Cuando los diferenciales de temperatura del hormigón sean muy grandes, seguro favorecerá la pérdida de humedad por evaporación.
- Oportunidad en la iniciación del curado; se recomienda iniciar lo más pronto posible; en el hormigón es factible hacerlo tan pronto éste reabsorbe el agua de exudación.

❖ **Relación entre el curado y desarrollo de resistencias**

Si sabemos que la reacción química del agua con el cemento desarrolla resistencia, en los primeros 7 días de edad prácticamente desarrollará cerca del 80% de la resistencia especificada para los 28 días; es decir, esto se cumplirá si se dio un curado adecuado.

Por eso, mientras más tardemos en iniciar el curado, menor potencial de resistencia disponemos.



FIGURA 2.8.2-1 CURVA TIEMPO - RESISTENCIA

Como podemos apreciar, el curado continuo permite que el hormigón desarrolle el máximo de su resistencia potencial; es decir no se debe permitir que el hormigón se seque en ningún momento. Si permitimos que el hormigón se seque, se detiene por completo la reacción química del agua con el cemento y deja de ganar resistencia. Mojar el hormigón después de que se haya secado sólo permite rescatar una pequeña parte de su resistencia potencial. De ninguna manera se va a conseguir recuperar la resistencia que podría tener la mezcla con el curado continuo.

El curado se puede realizar de varias maneras:

- Mojar la estructura permanentemente (esto no siempre es posible).
- Cubrir las estructuras con telas de plástico bien apegadas a la superficie (hay que asegurarse que no haya circulación de aire entre el plástico y el hormigón).
- Cubrir con pinturas impermeables la superficie del hormigón (estas pinturas son especiales y están a disposición en cualquier comercio de aditivos a precios accesibles)
- Mientras el hormigón está fresco, evitar contacto con sustancias agresivas (aguas servidas, desechos industriales, aguas sulfurosas, etc.)

El objetivo fundamental es evitar que la mezcla se seque antes de que haya ganado la resistencia requerida.

❖ **Dosificación de mezclas de hormigón con Fibras de Caucho**

A fin de simplificar el trabajo de investigación en su parte experimental, se tendrá que tomar en cuenta algunos criterios y consideraciones para volver constantes algunas variables y poner en claro todas las condiciones que tienen que seguir los materiales y mezclas preparadas, para poder realizar la comparación final en los resultados que se obtengan. Para esto se realizarán mezclas de prueba partiendo de un factor común que es la dosificación del hormigón patrón, que como se verá más adelante corresponde en proporciones a una dosificación 1:2,1:3,2 para un hormigón A 210.

Como se mencionó, a efectos prácticos se mantendrán constantes las cantidades de cemento y arena, variando de forma gradual el contenido de agregado grueso, y la adición de fibras de caucho inicialmente en un 0.025%, luego un 0.050% y luego un 0.100%, lo cual es la recomendación de un hormigón fibroreforzado.

Dicho material será adherido al volumen del concreto, en peso, por lo que las proporciones de los materiales a utilizar quedarán iguales a las cantidades iniciales obtenidas en los cálculos de dosificación.

Otra variable que aparece en este caso será la cantidad de agua de amasado debido a las características de los materiales en su calidad de % de humedad, por lo cual se deberá realizar un control a fin de que la mezcla que se obtenga sea de similares características a la convencional.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Generalidades

Este capítulo abarca todo cuanto se refiere a la parte práctica de ensayos efectuados en laboratorio, como también a los procedimientos de dosificación de mezclas de hormigón; los cuales se detallan a continuación:

- Detalle de las planillas de caracterización correspondiente a los materiales componentes de las mezclas de prueba.

Son planillas estandarizadas por el laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS, en las cuales se muestra cada uno de los resultados requeridos para poder abarcar el estudio y conseguir los objetivos propuestos.

- Detalle del cálculo de la dosificación para realizar la mezcla de prueba del hormigón patrón, y los diferentes porcentajes de fibras a utilizar para cada mezcla.
- Detalle de las planillas que contienen los resultados de roturas de los hormigones, que se procesaron para obtener los datos y resultados de compresión requeridos.
- Detalle de las planillas que contienen los resultados del ensayo (ASTM 1579-06) Retracción plástica del Hormigón Fibroreforzado.
- Diagramas de los resultados de resistencia obtenidos.
- Diagramas de las fisuraciones obtenidas en la prueba, haciendo un análisis comparativo.
- Diagramas comparativos de los resultados de las mezclas.
- Análisis de costos de producción.

3.2 Ensayos a los componentes del hormigón para caracterización de los componentes de la mezcla

3.2.1 Determinación de la finura del cemento

El objeto de este método es la determinación de la finura del cemento por medio del tamiz de malla N° 200.

✓ Equipo utilizado

1 Tamiz N° 200

1 Balanza de capacidad de 100 gr. y una sensibilidad al 0.5

1 Brocha

✓ Procedimiento

- Pesar 50 gr de cemento para determinar finura
- Agitar la muestra utilizando el tamiz de malla N° 200 con tapa y base imprimiendo con ambas manos con movimientos verticales y horizontales con golpes de vez en cuando.
- Se quita la tapa y se separa la malla N° 200 vaciando la fracción de cemento que podría ser retenida en ella, sobre un papel limpio a las partículas que han quedado atrancadas entre los hilos de la malla no hay que forzarlos a pasar a través de ella inviertase el Tamiz y con ayuda de un cepillo o brocha de alambre desprenda y agregue depositadas en el papel.
- Se pesa cuidadosamente la fracción de la muestra obtenida en el paso anterior. Se pone en un recipiente o cápsula se guarda esa fracción de muestra hasta el final de la prueba, para poder repetir las pesadas en caso de error.
- Se hacen las pesadas de las fracciones retenidas de cada malla y el recipiente del fondo procediendo en la forma indicada todos los pesos retenidos se anotan en la hoja del registro para el cálculo.
- Se calcula utilizando la fórmula.

$$F = \frac{P_r}{50} * 100$$

Dónde:

F = Finura del cemento expresado como porcentaje en peso, del residuo que no pasa el Tamiz. 200

Pr = Peso del residuo que no pasa el tamiz N° 200 en gr.

✓ **Resultados**

La planilla de cálculo correspondiente se presenta en anexo A-1 del presente trabajo.

TABLA 3.2.1-1: FINURA DEL CEMENTO

Ensayo N°	Finura Cemento %
1	7,20
2	6,76
3	7,26
Promedio	7,07

FIGURA 3.2.1-1: MATERIALES Y EQUIPO EMPLEADO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FINURA DEL CEMENTO



TAMIZADO DEL CEMENTO

3.2.2 Determinación del peso específico del cemento

Este ensayo tiene por objeto, presentar un método para determinar el peso específico del cemento, el valor que aquí se determina se usa específicamente para el diseño y control de la producción de mezcla de hormigón.

✓ **Equipo**

- Un matraz normal
- Kerosenne
- Balanza sensible a 0,001gr.
- Pipeta
- Un termómetro
- Embudo
- Material de limpieza
- Muestra de Cemento

✓ **Calibración de los matraces**

El peso del kerosenne de un matraz varia con la temperatura, esto se debe a que los cambios de temperatura provocan extensiones o contracciones en el vidrio.

Por lo tanto, cuando se va a determinar el peso específico del cemento es necesario conocer la capacidad del matraz que se va a usar a la temperatura a la cual se va hacer el ensayo.

✓ **Procedimiento**

- Se llena el matraz con el líquido especificado.
- Se coloca el matraz en un baño maría a temperatura constante manteniéndola a la temperatura ambiente, se lee en el cuello del matraz.
- Se toma aproximadamente 64 gr. de la muestra de cemento y se van introduciendo poco a poco en el matraz teniendo cuidado que estén a la misma temperatura que el líquido, se debe evitar que el líquido salpique cuando se introduce el cemento.

- Después de que todo el cemento haya sido introducido en el matraz se tapa este y se hace rodar en posición inclinado con el fin de eliminar el aire del cemento, esto se continúa hasta que se eliminen las burbujas de aire.
- Se coloca de nuevo el matraz en el baño de temperatura constante, y se hace la nueva lectura.
- Se lee en el matraz la graduación correspondiente al nuevo nivel del líquido

✓ **Cálculo**

La diferencia entre las cantidades que representan el nivel final y el nivel inicial del líquido nos da el volumen de líquido desplazado por el cemento usado en el ensayo, luego:

$$P. E. = \frac{\text{Peso del cemento en gramos}}{\text{Volumen desplazado en ml}}$$

✓ **Resultados**

La planilla de cálculo correspondiente se presenta en anexo A-1 del presente trabajo.

TABLA 3.2.1-2: PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO

Muestra N°	Peso Especifico Cemento (gr/cm ³)
1	3,14
2	3,15
3	3,15
Promedio	3,15

3.2.3 Análisis granulométrico de los agregados

Este método de ensayo abarca el procedimiento para la determinación de los tamaños de las partículas de agregado fino y grueso empleando tamices de aberturas cuadradas.

✓ **Materiales y equipo**

- Balanza electrónica
- Juego de tamices
- Muestra de grava (Obtenida por cuarteo)
- Muestra de arena (Obtenida por cuarteo)

- Brochas para limpiar los tamices
- Recipientes o taras

✓ **Procedimiento experimental**

Grava:

- Después de asegurarse que la muestra está completamente limpia es decir libre de impurezas como ser tierra , arcilla , limo , etc. se siguen los siguientes pasos
- Se cuartea la muestra, de una cuarta parte de la misma se pesan 15 Kg.
- Una vez pesados los 15 Kg de la muestra se procede al tamizado con juego de tamices en el cual tienen que estar comprendidos los siguientes tamices :

1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4

- Después del tamizado se pesan los pesos retenidos llevándolos a porcentajes de tal manera que se puedan graficar para verificar si están en los rangos comprendidos para ser aceptados como apropiados para la preparación de hormigón.
- Lo que se tiene que tener en cuenta es que al pesar se debe realizar con el máximo cuidado posible para que los resultados sean satisfactorios.

FIGURA 3.2.3-1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO
(GRAVA)



Arena:

- Después de asegurarse que la muestra está completamente limpia es decir libre de impurezas como ser tierra , arcilla , limo , etc. se siguen los siguientes pasos
- Se cuartea la muestra, de una cuarta parte de la misma se pesan 500 gr.
- Una vez pesados los 500 gr de la muestra se procede al tamizado con juego de tamices en el cual tienen que estar comprendidos los siguientes tamices :

N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100, N° 200

- Después del tamizado se pesan los pesos retenidos llevándolos a porcentajes de tal manera que se puedan graficar para verificar si están en los rangos comprendidos para ser aceptados como apropiados para la preparación de hormigón.
- Lo que se tiene que tener en cuenta es que al pesar se debe realizar con el máximo cuidado posible para que los resultados sean satisfactorios.

FIGURA 3.2.3-2: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO



✓ Cálculo

El peso del material retenido sobre cada tamiz será anotado y expresado como sigue:

- Por ciento retenido sobre cada tamiz.
- Por ciento total que pasa por cada tamiz.

✓ Resultados

Las planillas de cálculo y las curvas granulométricas correspondientes se presentan en anexo A-1 del presente trabajo.

Para el agregado Grueso:

Tamaño máximo del agregado: 3/4"

Contenido de humedad: 1.35%

Para el agregado fino:

Módulo de Finura: 2.52

Contenido de humedad: 2.79%

Tanto como los ensayos y curvas cumplen con los parámetros de la normativa ASTM.

3.2.4 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso

El ensayo que a continuación se describe tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

✓ Material y equipo utilizado

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Una balanza con capacidad de 20 Kg y sensible.
- Cesto de alambre o cilindro metálico de 20 cm de diámetro y 20 cm de alto. El cesto hecho con malla de 4,75 mm. de abertura.
- Un recipiente en el que se pueda sumergir la cesta de alambre y un aparato para suspender la cesta cuando se sumerge, con el fin de obtener el peso de la muestra sumergida.

✓ Procedimiento

- Se lava el material a fin de remover el polvo o cualquier impureza que cubra la superficie de las partículas, luego se sumerge la muestra con agua por un periodo de 24 horas.
- Se obtiene después la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido de la superficie. Se deberá evitar la evaporación durante esta operación.
- Después se obtiene el peso de la muestra con sus partículas saturadas.
- La muestra se vuelve a sumergir después de ser pesada y se determina si pesa la muestra así sumergida.

- Se seca la muestra en un horno de temperatura constante (105° C) y luego se deja enfriar y se pesa.

✓ **Muestra**

La muestra consiste aproximadamente en 5 Kg material separado por su método de cuarteo de manera que todo el material queda retenido sobre el tamiz de 3/8.

✓ **Cálculos**

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

Siendo:

A = Peso de la muestra secada en horno en gr.

B = Peso de la muestra saturada pero con superficie seca en gr.

C = Peso de la muestra satura dentro del agua en gr.

$$\text{Peso específico saturado sup. seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

✓ **Resultados**

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en el anexo A-1.

	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
Grava	2.48	2.52	2.58	1.66

FIGURA 3.2.4-1: DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA)



3.2.5 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino

El ensayo que se describe a continuación tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresado como porcentaje en peso.

✓ Equipo necesario

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Una balanza con capacidad de 1 Kg y sensible de 0,1 gr.
- Matraz de 500 ml
- Horno eléctrico
- Secador
- Un molde cónico de acero con varilla.

✓ Muestra

Se selecciona una muestra de 1 kg que puede ser obtenida por cuarteo; luego se coloca la muestra dentro de un recipiente lleno de agua y se deja allí por un periodo de 24 horas.

✓ Procedimiento

- Se lava el material a fin de sacar la arcilla que puede estar en la arena o cualquier impureza que cubra la superficie de las partículas.
- Luego se seca la muestra del recipiente y se seca de manera uniforme, con el fin de inspeccionar que tan seca esta la muestra, se coloca primero el molde cónico, y luego se retira éste. Si la muestra tiene alguna humedad en la superficie conservará la forma cónica y si por el contrario la humedad de la superficie ha sido eliminada, la arena rodará libremente cuando se levante el cono.
- Por lo general si la arena rueda libremente la primera vez que se coloca el cono, esto es indicación de que la muestra ha sido secada más de lo necesario y que ha perdido su condición de saturada; por consiguiente, se deberá rociar con agua y dejarla reposar por 30 minutos antes de volver a colocar en el cono.
- Se coloca 500 gr. De la muestra en el matraz y luego se llama este con agua hasta el tope con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre sí mismo y luego se coloca en un baño a temperatura constante de 20 ° C, se deberán hacer las correcciones del caso siguiendo una curva de calibración. Luego se obtiene el peso del matraz lleno.
- Se vacía el contenido del matraz en un recipiente y se pone secar en el horno de temperatura constante (105° C) y se pesará.

✓ **Cálculos**

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

Siendo:

A = Peso al aire de la muestra secada al horno en gr.

V = Volumen del frasco en ml

W = Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco.

$$\text{Peso Específico saturado sup. seca} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

✓ Cálculos

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en el anexo A-1.

	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
Arena	2.44	2.53	2.67	3.35

FIGURA 3.2.5-1: DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO



3.2.6 Determinación del peso unitario del agregado grueso

Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

✓ Materiales y equipo

- Balanza electrónica.

- Una varilla de 60 cm de largo y 5/8 plg.
- Molde cilíndrico de 14 l.
- Recipientes.

✓ **Procedimiento**

Se procede a realizar el cuarteo del material hasta obtener una muestra representativa para realizar la práctica. Posteriormente se obtiene el peso del molde vacío para después obtener el peso de material que puede introducirse en el molde.

Para obtener el peso unitario compactado:

- Llenado el cilindro hasta una tercera parte de su volumen.
- Compactado mediante la varilla de 60 cm introduciéndola con fuerza unas 25 veces, teniendo cuidado de no golpear el fondo del cilindro.
- Llenado de la segunda tercera parte del cilindro
- De igual manera realizar el compactado del material con la varilla
- Llenar el cilindro con el material restante y compactar.
- Una vez compactada realizar el posterior enrase del material
- Llenar los espacios vacíos con las gravas más pequeñas.
- Pesar el molde.

✓ **Cálculo**

El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando del peso del molde más la muestra compactada, el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

✓ **Resultados**

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en el anexo A-1.

	Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	Peso Unitario Compactado (gr/cm ³)
Grava	1661	1687

FIGURA 3.2.6-1: DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA)



3.2.7 Determinación del peso unitario del agregado fino

Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

✓ Materiales y equipo

- Balanza Electrónica
- Cuchara
- Muestra de Arena
- Varilla
- Bandejas
- Molde Cilíndrico de 3l.
- Brocha

✓ Procedimiento experimental

Peso unitario compactado

- Se llena el molde con el agregado fino hasta una tercera parte de su capacidad, por medio de la varilla se apisona uniformemente mediante 25 impactos, no se debe golpear el fondo del molde.
- Se repite el procedimiento anterior hasta completar las tres capas y llenar el recipiente, las partículas de la superficie se deben enrasar con una varilla, teniendo como guía el borde del molde.
- El apisonamiento deberá realizarse con una caída de la varilla de una altura de diez centímetros.
- Una vez hecho esto se pesa el molde solo y luego el molde con la muestra.

✓ Cálculo

El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando del peso del molde más la muestra compactada, el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

✓ Resultados

Los valores que se muestran son datos promedio, las planillas de cálculo para cada material se encuentran en el anexo A-1.

	Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	Peso Unitario Compactado (gr/cm ³)
Arena	1388	1574

FIGURA 3.2.7-1: DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL AGREGADO
FINO



3.2.8 Dosificación método ACI - 211



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
"JUAN MISAEL SARACHO"**

**FACULTAD DE
CIENCIAS Y
TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE
INGENIERÍA CIVIL**

**LABORATORIO DE SUELOS Y
HORMIGÓN - ING. CIVIL**

DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES MÉTODO ACI-211

Proyecto: Análisis de Reducción de Fisuras en el H° Aplicando Fibras de Caucho Procedencia: Tarija, Cercado - San Blas Solicitante: Univ. Vergara Torrez José Fernando	Laboratoristas: Univ. Vergara T. Fernando Fecha: 11/05/2016
---	---

CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Módulo de finura de la arena (MF)	s/u	2.52
2.- Peso unitario Compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1687
3.- Peso específico de la arena (γ_f)	gr/cm ³	2.67
4.- Peso específico de la grava (γ_g)	gr/cm ³	2.58
5.- Absorción de la arena (Aa)	%	3.35
6.- Absorción de la Grava (Ag)	%	1.66

7.- Humedad de la Arena (Ha)		%	2.79
8.- Humedad de la Grava (Hg)		%	1.35
9.- Tamaño máximo Nominal (TMN)		cm	1.90
10.- Tamaño Máximo (TM)		cm	1.90
11.- Peso específico del cemento		gr/cm ³	3.14

CARACTERISTICAS DEL DISEÑO

Resistencia de diseño (fck)	210	kg/cm ²
Resistencia Característica (fck) (Tabla 11.12)	295	kg/cm ²
Asentamiento (S) (Tabla 11.4)	5	pulg
Relacion Agua / Cemento (a/c) (Tabla 11,13)	0.533	s/u

DATOS DE TABLAS

Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (b/bo) (Tabla 11.15)	0.65	s/u
Requerimiento de Agua (A) (Tabla 11.6)	185	kg/m ³

CALCULOS

Peso Agregado Grueso (Pag)	= (b/bo)xPUC 1096.55	kg/m ³
Peso cemento (Pc)	= A / (a/c) 347.09	kg/m ³
Volumen de Agregado Grueso (Vag)	= Pag/γg 425.02	lt/m ³
Volumen del cemento (Vc)	= Pc/γc 110.54	lt/m ³

	4.15	lt/m ³
Total Agua Corregida (Atc)	= Acg + Acf	7.53 lt/m ³

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE HORMIGON

Ingrediente	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo kg/m ³
<i>Cemento</i>	347.09	347.09
<i>Agua</i>	185.00	192.53
<i>Grava</i>	1096.55	1111.37
<i>Arena</i>	746.11	766.93
<i>TOTAL</i>	2374.75	2417.91

PROPORCIONES DE MEZCLA

<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
1.0	2.1	3.2

OBSERVACIONES

1.- Las humedades tanto de la grava como de la arena corresponden a las obtenidas en laboratorio debiendo hacer las correcciones adecuadas en obra en el momento del vaciado.

2.- La presente dosificación no tendrá efecto en caso de agregados contaminados o sucios, con:

- Arcillas o finos, materiales orgánicos, residuos de otros materiales, etc.
- Por lo que se recomienda lavar siempre los áridos antes de utilizarlos.

3.2.9 Preparación del hormigón en el laboratorio para los ensayos de compresión

Abarca el procedimiento de preparación del hormigón, el mismo que se realizó en el laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS y que está a cargo del Ing. Moisés Díaz Ayarde, bajo un riguroso control de cantidades de materiales y condiciones de ensayo.

Preparación de los materiales:

- a) Por recomendación los materiales se mantuvieron a la temperatura del ambiente (entre 18° y 24° C) antes de empezar los ensayos.
- b) El cemento se almacenó en un lugar seco del laboratorio, a prueba de humedad. El cemento se mezcló completamente a fin de que la muestra pueda ser uniforme durante los ensayos.
- c) Los agregados para cada preparación de hormigón estuvieron de acuerdo con la granulometría deseada.

- **Pesada de los materiales**

Todos los materiales fueron pesados en balanzas precisas y sensibles al gramo, acorde con los requisitos exigidos en cuanto a sensibilidad recíproca y tolerancias.

FIGURA 3.2.9-1: MATERIALES YA PESADOS Y LISTOS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN



- **Mezclado del hormigón**

- a) El hormigón fue mezclado en una hormigonera mediana, la misma que era adecuada para la cantidad de hormigón que se debía preparar, dicha cantidad debe ser suficiente, tal que, después de moldear las probetas de ensayo, existiría un exceso o margen de seguridad por pérdidas de un 10%.
- b) Para tener una idea más clara del proceso de mezclado, a continuación se indica el orden y manera de introducir los materiales a la hormigonera activada para obtener una mezcla homogénea y satisfactoria para la elaboración del hormigón.
 - 1) Luego de haberse introducido la mitad de la cantidad de agua necesaria, se introduce la porción total de arena y luego la de cemento, para que estas sean mezcladas hasta un estado homogéneo.
 - 2) Se añade el agregado grueso a la preparación y ésta se mezcla hasta que dicho agregado grueso se distribuya uniformemente en toda la mezcla.
 - 3) Se añade la otra mitad de la cantidad de agua medida y necesaria para luego ver como la masa se mezcla hasta que el hormigón toma un aspecto homogéneo y tenga la consistencia deseada para luego realizar los ensayos de asentamiento.
- c) El método anteriormente indicado es un buen parámetro para lograr una mezcla satisfactoria, a menos que un procedimiento diferente se adapte mejor a la hormigonera que se está empleando.

FIGURA 3.2.9-2 MEZCLADO DE LAS MUESTRAS DE HORMIGÓN



- **Consistencia del hormigón**

a) La consistencia de cada preparación de hormigón se mide inmediatamente después de mezclar, realizando el ensayo de asentamiento, utilizando el método del Cono Abrams, para lo cual se precisa el siguiente equipo:

- Molde de metal galvanizado en forma de tronco de cono, diámetro de la base superior 4"; diámetro de la base inferior 8" y una altura de 12".
- Regla graduada o flexómetro para medir el asentamiento de la mezcla.
- Varilla para apisonar el hormigón de 5/8" y 60 cm de longitud.

Se toma una muestra representativa de la mezcla cuya consistencia se quiere determinar y se coloca el molde sobre una superficie plana que no sea absorbente. El molde se llena usando tres capas de mezcla. Cada capa se compacta con 25 golpes de la varilla distribuidos uniformemente.

Después de llenar el molde como se indica, se retira este con un movimiento vertical.

Inmediatamente después se determina por medio de una regla el asentamiento de la muestra con relación a su altura inicial, asimismo la consistencia es expresada en términos de asentamiento.

b) Todo el hormigón empleado para el ensayo de asentamiento es devuelto al recipiente de mezcla e inmediatamente se procede a vaciar la mezcla en los moldes de realización de probetas.

FIGURA 3.2.9-3: ENSAYO DE ASENTAMIENTO A LAS MEZCLAS REALIZADAS



- **Probetas para el ensayo de compresión**

Las probetas para el ensayo de compresión son de forma cilíndrica con una longitud igual a dos veces el diámetro. Las probetas cilíndricas estándar son de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para hormigón con agregado grueso de tamaño nominal inferior a 2" que son las que se utilizaron para los ensayos realizados.

Los moldes para las probetas de ensayo son de metal y están provistos de una placa metálica lisa y plana. El interior del molde y la placa metálica de la base se cubren con una capa delgada de aceite mineral o grasa antes de preparar cada cilindro de hormigón, para evitar que el hormigón se adhiera al molde cuando comience su endurecimiento.

FIGURA 3.2.9-4 PROBETAS REALIZADAS Y MOLDES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS



- **Procedimiento de vaciado y realización**

- Los cilindros de ensayo son preparados colocando el hormigón en el molde en 3 capas de un volumen aproximadamente igual.

- Al colocar cada cucharada de hormigón, la cuchara se hace girar alrededor del borde superior, para que el hormigón se deslice por las paredes del molde y se distribuya uniformemente.
- Cada capa se debe golpear 25 veces distribuyéndose uniformemente sobre la sección con una barra de 5/8" de diámetro y 60 cm de largo con punta redondeada que es la misma que se utiliza para el ensayo de asentamiento, después la superficie debe ser alisada y en lo posible cubierta.
- Los cilindros de ensayo se remueven de 20 a 48 horas después de su preparación y son sumergidos completamente para su curado en un cuarto húmedo o en una piscina a modo de que esté saturado completamente en agua entre 18 y 24 ° C.

FIGURA 3.2.9-5: VACIADO Y REALIZACIÓN DE PROBETAS



- **Curado De las probetas de prueba**

El proceso de curado de las probetas de prueba se realizó en las piscinas del laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS.

Es un proceso simple de sumergimiento que se realiza inmediatamente después de remover las probetas de sus moldes.

Se debe tener mucho cuidado de no golpear las probetas en este proceso ya que las mismas se encuentran muy frágiles y esto puede incidir en su futura resistencia.

La etapa de curado finaliza 10 a 20 horas antes de someterlas a su rotura.

3.2.10 Determinación de resistencia a compresión en probetas

Este método abarca el procedimiento para los ensayos de compresión de cilindros de hormigón

✓ **Equipo**

La máquina utilizada es una prensa automática de compresión que pertenece al laboratorio de suelos y hormigones de la UAJMS, la misma que proporciona una velocidad de carga adecuada y está equipada con dos placas de acero de apoyo.

✓ **Procedimiento**

- Se coloca el cilindro en la máquina y se centra con relación a la placa superior. Se pone la placa superior en contacto con el espécimen.
- Se aplica la carga a una frecuencia de aumento constante y uniforme de acuerdo a la configuración de la máquina previa al ensayo.
- La carga incrementará hasta que el espécimen falle por rotura. Se deberá anotar esta carga máxima aplicada, lo mismo que el tipo de fractura del cilindro.

✓ **Cálculo**

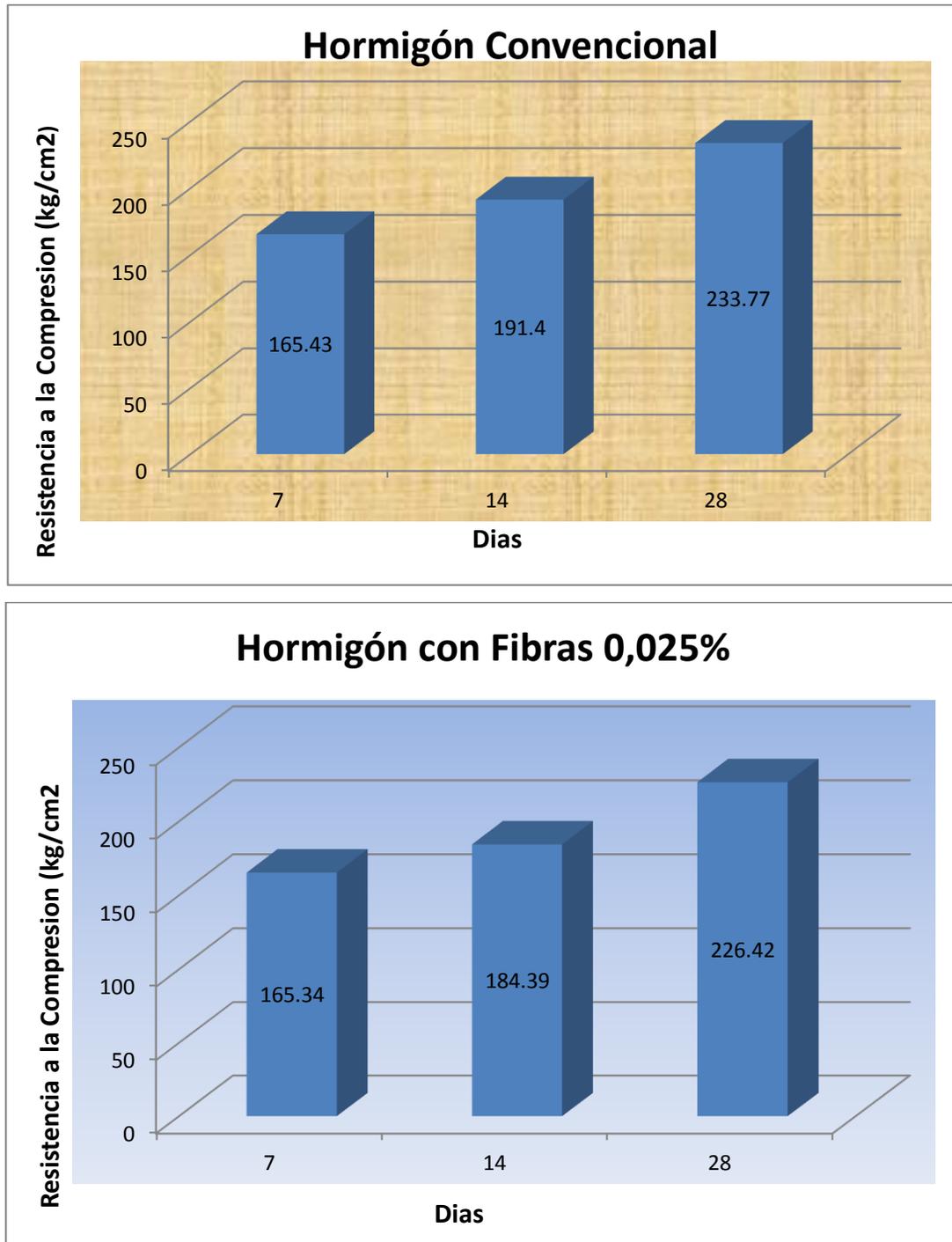
La resistencia a la compresión se obtendrá dividiendo la carga máxima aplicada por el área del cilindro, calculada con el diámetro obtenido antes de aplicar la carga. Las planillas de cálculo para cada una de las mezclas se encuentran en el anexo A-2 del presente estudio.

FIGURA 3.2.10-1: ENSAYOS DE ROTURA DE PROBETAS



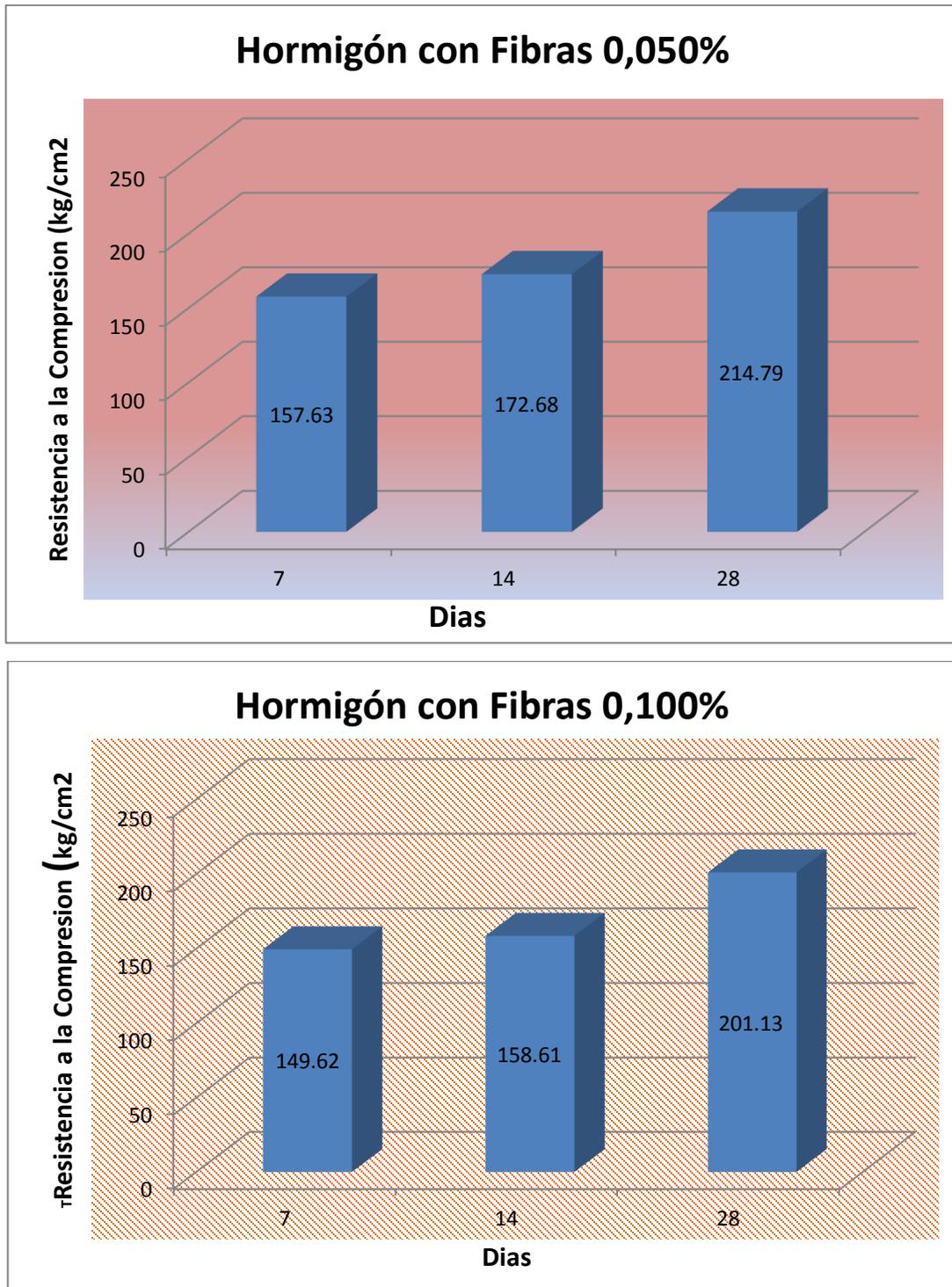
3.2.11 Valores de resistencia obtenidos

FIGURA 3.2.11-1DIAGRAMAS DE BARRAS DE LOS VALORES DE RESISTENCIA OBTENIDOS



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 3.2.11-1 DIAGRAMAS DE BARRAS DE LOS VALORES DE RESISTENCIA OBTENIDOS



Fuente: Elaboración propia

3.3 Análisis de Reducción de Fisuras en el Hormigón Aplicando Fibras de Caucho Mediante el Método ASTM 1579-06

Determinación de la cantidad de FIBRAS DE CAUCHO.

Como en nuestro perfil indicamos que haremos una dosificación en función a 1m^3 de hormigón, entonces obtendremos el volumen de cada porcentaje de fibra de caucho establecido y calcularemos el peso necesario para aplicar a la mezcla.

total volumen para 0.025%	0.046398 m³	115 gr.
total volumen para 0.050%	0.046398 m ³	232 gr.
total volumen para 0.10%	0.046398 m ³	464 gr.
TOTAL CAUCHO		811 gr.

NÚMERO DE LOSAS Y PROBETAS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

CARACTERÍSTICAS	Nº de paneles de hormigón para los ensayos de retracción plástica	Nº de probetas para el ensayo a compresión
H° con 0.025% fibras de caucho	4	6
H° con 0.050% fibras de caucho	4	6
H° con 0.100% fibras de caucho	4	6
LOSAS SIN ADICIÓN DE FIBRAS DE CAUCHO	12	6

Fuente: elaboración propia

3.3.1 PROCEDIMIENTO PARA EL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Previamente al desarrollo de la práctica y a la aplicación de la metodología para el análisis de la investigación se hace la mezcla del hormigón con su respectiva dosificación y rigiéndonos en las normas establecidas para la realización del trabajo.

En primer lugar tenemos que obtener la mezcla de hormigón, tanto del PATRÓN como del hormigón con FIBRAS DE CAUCHO.

Inicialmente se llevan los materiales necesarios para obtener la mezcla de hormigón necesaria y las fibras de caucho en peso necesarias para mezclarla con el hormigón. El mezclado de los materiales se realizará en una mezcladora tambor de eje horizontal de 0.75m³ de volumen, para la cual la norma nos da un parámetro para el tiempo de mezclado del hormigón.

TABLA 3.3.1-1 TIEMPO DE MEZCLADO DEL HORMIGÓN EN EL TAMBOR

Capacidad del mezclador m ³	Tiempo de mezclado minutos
1,5 ó menos	1,5
2,3	2,0
3,0	2,5
4,5	3,0

Para todos los ensayos también se determinarán los asentamientos, los cuales se obtendrán a partir del cono de Abrams.

TABLA 3.3.1-2 CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN

Asentamiento en el cono Abrams	Categoría de Consistencia
0 a 2 cm	Firme
3 a 5 cm	Plástica
6 a 9 cm	Blanda
10 a 15 cm	Fluida

3.3.2 Materiales y Compuestos para la Industria del Neumático

Origen, composición y características de los neumáticos

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire el cual soporta al vehículo y su carga. Su invención se debe al norteamericano Charles Goodyear quién descubrió, accidentalmente en 1880, el proceso de vulcanización, con el que se da al caucho la resistencia y solidez necesaria para fabricarlo.

En la actualidad, la mayoría de los neumáticos de vehículos de pasajeros como los de camión son radiales, por lo que están compuestos de una banda de rodamiento elástica, una cintura prácticamente inextensible y una estructura de arcos radialmente orientada, sobre una membrana inflada y sobre unos aros también inextensibles que sirven de enganche a otro elemento rígido, que es la llanta. También existe otro tipo de neumáticos llamados diagonales, utilizados principalmente en camiones.

La complejidad de la forma y de las funciones que cada parte del neumático tiene que cumplir se traduce también en una complejidad de los materiales que lo componen. El principal componente del neumático es el caucho: casi la mitad de su peso.

La fabricación de neumáticos concentra un gran porcentaje de la industria del caucho

Constituyendo el 60 % de la producción anual del mismo.

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según sea el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira.

El caucho natural se extrae a partir del árbol *Hevea Brasiliensis* que es un látex con partículas de caucho en suspensión. Después de un proceso de secado y de ahumado se utilizan diferentes productos. Hoy en día alcanza el 30 % del mercado de los cauchos, el resto lo ocupan los cauchos sintéticos, todos basados en hidrocarburos. Los tipos de caucho más empleados en la fabricación de los neumáticos son:

Cauchos naturales (NR) Polibutadienos (BR)

Estireno – Butadieno (SBR) Polisoprenos sintéticos (IR)

La matriz de caucho más utilizada es el copolímero estireno-butadieno (SBR), en el que la proporción es de aproximadamente un 25 % en peso de estireno, o una mezcla de caucho natural y SBR.

Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero también con algo en común:

Todos, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que necesitarían una gran cantidad de tiempo para su degradación.

La combinación se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionen elasticidad y los sintéticos, estabilidad térmica. Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito. La estructura de los cauchos naturales está formada por cis-1,4 polisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales inorgánicas, entre otros. Se encuentra así un polímero de cadena larga y enredada en forma de espiral, de peso molecular medio, 5×10^5 g/mol, que a temperatura ambiente está en un estado de agitación continua. Este comportamiento general es debido en parte al impedimento estérico del grupo metilo y el átomo de hidrógeno, en el mismo lado del doble enlace carbono-carbono. Esta cadena se complementa con otro isómero estructural llamado gutapercha.

Vulcanización

La vulcanización es un proceso mediante el cual se calienta el caucho crudo en presencia de azufre, con el fin de volverlo más duro y resistente al frío. Durante la vulcanización, los polímeros lineales paralelos cercanos constituyen puentes de entrecruzamiento entre sí. El resultado final es que las moléculas elásticas de caucho quedan unidas entre sí a una mayor o menor extensión. Esto forma un caucho más estable, duro, con mayor durabilidad, más resistente al ataque químico y sin perder la elasticidad natural. También transforma la superficie pegajosa del material en una superficie suave que no se adhiere al metal o a los sustratos plásticos.

La vulcanización es un proceso de cura irreversible y debe ser fuertemente contrastado con los procesos termoplásticos que caracterizan el comportamiento de la vasta mayoría de los polímeros modernos. Este proceso irreversible define a los cauchos curados como materiales termorígidos (no se funden con el calor) y los saca de la categoría de los termoplásticos (como el polietileno y el polipropileno). Usualmente el entrecruzamiento químico es realizado con azufre, pero existen otras tecnologías como los sistemas basados en peróxidos. Se suelen usar combinadamente con agentes aceleradores y retardadores.

Vulcanizar el caucho es el tratamiento por medio del que se combina con azufre y otros compuestos. Bajo la acción del calor apropiado junto con el azufre, y a veces de la luz, el caucho sufre profundas modificaciones, las cuales son motivo de especulación científica e industrial. Una lámina de caucho de 2 milímetros de espesor sumergida en un baño de azufre fundido a 120cc. Se hincha ligeramente y la goma entra en combinación con el azufre produciéndose la vulcanización. Elevando la temperatura entre 1300° y 1400° C y manteniendo el tratamiento entre 30 y 40 minutos, el aspecto y las propiedades del caucho se modifican, la substancia toma un color gris amarillento, su elasticidad aumenta considerablemente con la particularidad de que el frío no la anula como sucede con el caucho crudo. Este fenómeno conocido con el nombre de vulcanización, puede producirse a diversas temperaturas comprendidas entre el punto de fusión del azufre y los 160°C. La vulcanización se produce más rápidamente a esta última temperatura, pero la

experiencia ha demostrado que los mejores resultados son los obtenidos cuando se vulcaniza a 120°C., lo que exige en cambio prolongar por más tiempo la operación. Sí se prolonga la operación de vulcanizado elevando la cantidad de calor entre 150° y 160° por algunas horas entonces se obtiene un nuevo producto, en el cual la elasticidad ha desaparecido y el aspecto del caucho se ha modificado; se nos presenta ahora bajo una apariencia pardo oscura, en cierto grado quebradizo. El grado de vulcanización del caucho pende de varios factores, tales como el tiempo que dura el tratamiento, la temperatura, la presión y la cantidad de azufre agregado. Parece ser que el fenómeno de la vulcanización es el resultado de una verdadera combinación química en la que el caucho admite varios grados de combinación con el azufre hasta alcanzar la sobre saturación.

Diferencias y similitudes entre polímeros naturales y sintéticos

Polímeros naturales

Son aquellos provenientes directamente del reino vegetal o animal, como la seda, lana, algodón, celulosa, almidón, proteínas, caucho natural (látex o hule), ácidos nucleicos, como el ADN, entre otros. Existen polímeros naturales de gran significación comercial como:

- El algodón, formado por fibras de celulosas.
- La celulosa que se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel
- La seda es otro polímero natural muy apreciado y es una poliamida semejante al nylon.
- La lana, proteína del pelo de las ovejas, es otro ejemplo de polímero natural.
- El hule de los árboles de hevea y de los arbustos de Guayule, son también polímeros naturales importantes.

Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.

Polímeros sintéticos

Son los transformados o “creados” por el hombre. Están aquí todos los plásticos, los más conocidos en la vida cotidiana son el nylon, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC) y el polietileno. La gran variedad de propiedades físicas y químicas de estos compuestos permite aplicarlos en construcción, embalaje, industria automotriz, aeronáutica, electrónica, agricultura o medicina.

Hoy en día, el caucho posee múltiples utilidades en diferentes tipos de industrias (automotriz, calzado, adhesivos, etc.). Actualmente en la Argentina hay más de 300 empresas que elaboran productos relacionados con el caucho dando trabajo a más de 10.000 personas (obreros, técnicos y empleados).

El Caucho Estireno Butadieno más conocido como caucho SBR es un copolímero (polímero formado por la polimerización de una mezcla de dos o más monómeros) del Estireno y el 1,3-Butadieno. Este es el caucho sintético más utilizado a nivel mundial.

Diferencias entre el Caucho Sintético (SBR) y el Caucho Natural

A continuación se verá la comparación entre el caucho SBR y el caucho natural:

- SBR es inferior a la goma natural para su procesado, resistencia a la tracción y a la rotura, adherencia y calentamiento interno.
- SBR es superior en permeabilidad, envejecimiento, y resistencia al calor y desgaste.
- La vulcanización de SBR requiere menos azufre, pero más acelerador.
- El efecto reforzador del negro de carbón es mucho más pronunciado sobre SBR que sobre goma natural.
- Para uso en neumáticos, SBR es mejor para vehículos de pasajeros, en tanto que la goma natural es preferible para vehículos utilitarios y autobuses.
- Las SBR extendidas con aceite se usan principalmente para fabricación de neumáticos, correas cintas transportadoras, etc.) y suelas de zapatos; las mezclas maestras de SBR se emplean en la producción en masa de cubiertas de neumáticos.

Cuadro comparativo

PROPIEDADES | CAUCHO NATURAL | SBR

Rango de Dureza | 20-90 | 40-90

Resistencia a la rotura | Buena | Regular

Resistencia abrasiva | Excelente | Buena

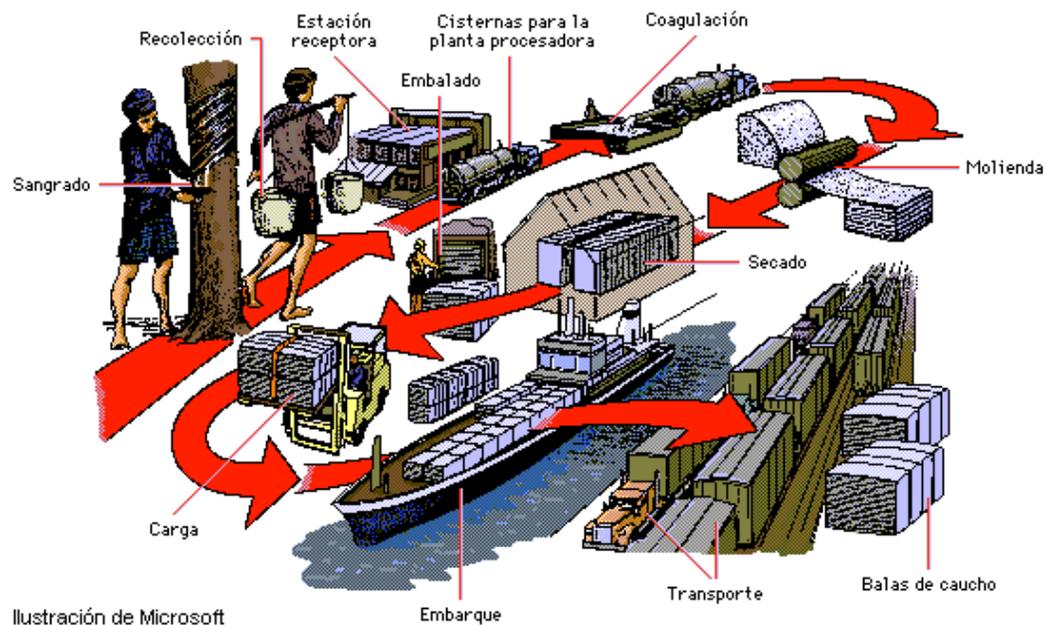
Resistencia a la compresión | Buena | Excelente

Permeabilidad a los gases | Regular | Regular

Caucho sintético

Puede llamarse caucho sintético a toda sustancia elaborada artificialmente que se parezca al caucho natural. Se obtiene por reacciones químicas conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros. Después de su fabricación, el caucho sintético se vulcaniza.

FIGURA 3.3.2-1 Esquema del proceso de industrialización del caucho



Fuente: sitio web - características del caucho natural y sintético

❖ CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS DE CAUCHO

TABLA 3.3.2-1 CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS DE CAUCHO

CARACRTERIZACION DE LAS FIBRAS DE CAUCHO	
PROPIEDADES	VALORES
Resistencia a la tracción (kg/cm ²)	247.00
Resistencia al desgarramiento	Buena a muy Buena
Resistencia a la abrasión	Excelente
Deformación permanente por compresión	Buena
Aislamiento eléctrico	Buena a Excelente
Resistencia a los ácidos Diluidos	Regular a Buena
Resistencia a los ácidos Concentrados	Regular a Buena
resistencia a aceites y Gasolinas	Mala
Resistencia a la Oxidación	Buena
Resistencia al fuego	Mala
Resistencia al calor	Buena
Resistencia al Frio	Excelente
Longitud (mm)	20-40
Diámetro (mm)	0.8-1
DOSIFICACION FIBRAS DE CAUCHO	CANTIDAD (kg/m ³)
0.025%	2.5
0.050%	5
0.100%	10

Fuente: Tesis doctoral “hormigón con fibras de caucho” Madrid 2007

3.3.3 Método Para el Análisis de las Patologías en el Hormigón (Retracción Plástica)

Resumen del método de ensayo

Esta metodología intenta evaluar los efectos de la evaporación, asentamiento y retracción autógena a edades tempranas, en el agrietamiento plástico de hormigones reforzados con fibras, hasta y por algunas horas después del final del fraguado.

Este método de ensayo consiste en utilizar dos probetas, la primera con un hormigón patrón (que puede o no incluir fibra en su dosificación) y una segunda de hormigón con fibras incorporadas, para comparar el comportamiento de ambas probetas frente

al agrietamiento por retracción plástica. Estas probetas son preparadas de acuerdo a una metodología preestablecida y son expuestas a condiciones controladas de secado antes de su término. Las condiciones de secado intentan ser bastante severas para inducir el agrietamiento debido a retracción plástica en la probeta hecha para el hormigón patrón.

Un parámetro importante en este método es la velocidad de pérdida de agua por evaporación, que es controlada por las condiciones atmosféricas circundantes a las probetas de ensayo. Ya que las probetas de hormigón no siempre tendrán la misma velocidad de evaporación de agua que el recipiente de agua usado para medir ésta pérdida en el ensayo (debido a los efectos de evaporación y exudación), la velocidad de evaporación de $1.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ desde el recipiente de agua representa la velocidad mínima de evaporación que debe ser conseguida para este ensayo. La pérdida de humedad desde las probetas de hormigón pueden también ser monitoreadas e informadas, sin embargo, la velocidad de evaporación desde la superficie libre del agua en el recipiente es un parámetro que puede ser usado para cuantificar las condiciones ambientales de secado.

El ensayo se termina en el momento del final de fraguado. Sin embargo, a 24 hrs. del inicio del mezclado, es determinado el espesor promedio de la fisura.

Los resultados obtenidos pueden ser usados para comparar el desempeño de hormigones con diferentes dosificaciones, hormigones con o sin adiciones de fibras y hormigones con diferentes tipos y porcentajes de aditivos.

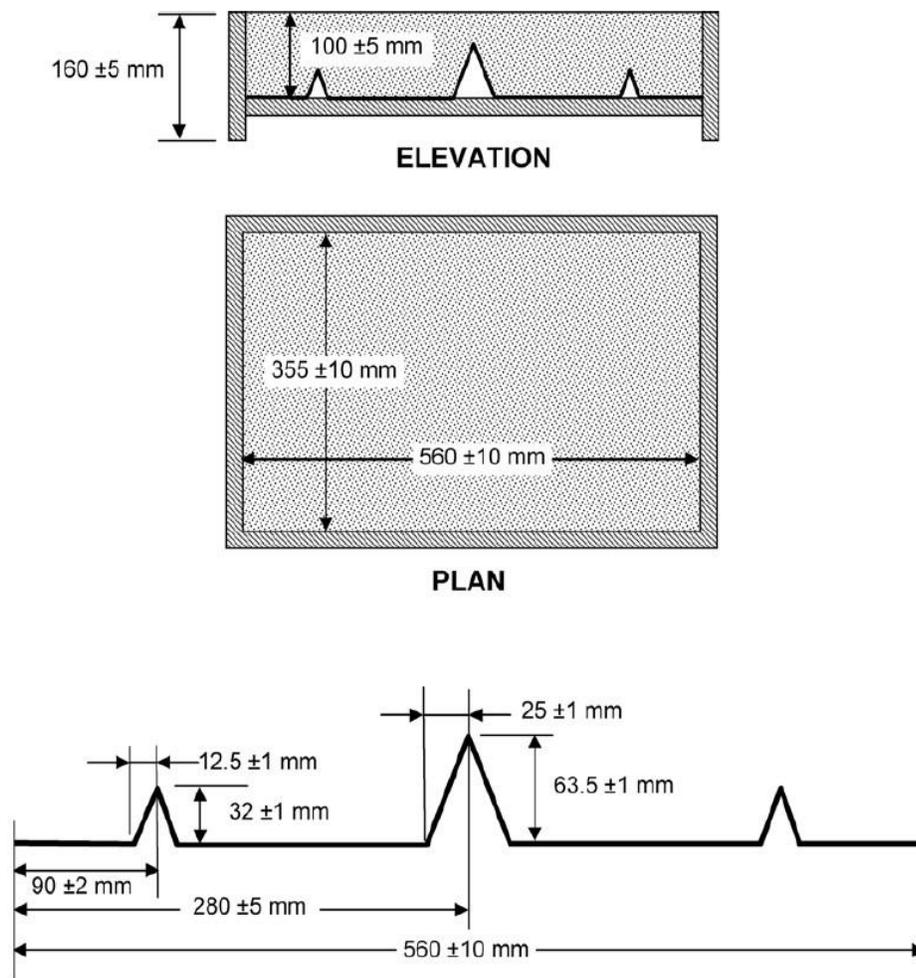
Este método intenta controlar las variables atmosféricas para cuantificar el rendimiento relativo de una mezcla de hormigón fresco dada. Debido a que muchas otras variables como la finura del cemento, graduación de los agregados, procedimientos de mezclado, descenso de cono, contenido de aire, temperatura del hormigón y terminación de la superficie también pueden influir en el agrietamiento potencial, una especial atención debe prestarse para mantener estos parámetros tan consistentes como sea posible entre mezclas.

Para el análisis de las Fisuraciones en el hormigón se determinarán de la siguiente manera:

Material y equipo necesario para el desarrollo del método.

Primeramente se harán las réplicas de losas de hormigón que para nuestro estudio se analizarán para el máximo tamaño de agregado grueso igual o menor de 19 mm, utilizar un molde con una profundidad de 100 ± 5 mm dimensiones rectangulares de 355 ± 10 mm por 560 ± 15 mm, el molde se puede fabricar de metal, plástico, o madera contrachapada.

FIGURA 3.3.3-1 DIMENSIONES DE LOS MOLDES PARA EL ANÁLISIS DE FISURACIÓN



Elevador de tensión y restricciones internas- Las restricciones internas y elevador de tensión se puede hacer de una pieza de chapa metálica, tal como se ilustra en la Fig. 1, o hacer de una pieza sólida de acero. La chapa debe tener un espesor de $1,2 \pm 0,05$ mm (Calibre 18) (Ver Fig. 1 y Ref 2). Dos restricciones de 32 ± 1 mm de alto se colocan a 90 ± 2 mm hacia el interior desde cada extremo de la molde. El elevador de tensión central de 64 ± 2 mm de altura y sirve como un punto de iniciación para la formación de fisuras. Este elevador de tensión con las restricciones internas deberá ajustarse en la parte inferior del molde.

Usar aceite desmoldante para cubrir la base y los lados del molde para reducir la adherencia al hormigón. La inserción y el retirado del engrasado son considerados correctamente cuando toda la superficie es recubierta de aceite y el exceso se ha eliminado con un trapo limpio y seco.

FIGURA 3.3.3-2 MOLDES PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO



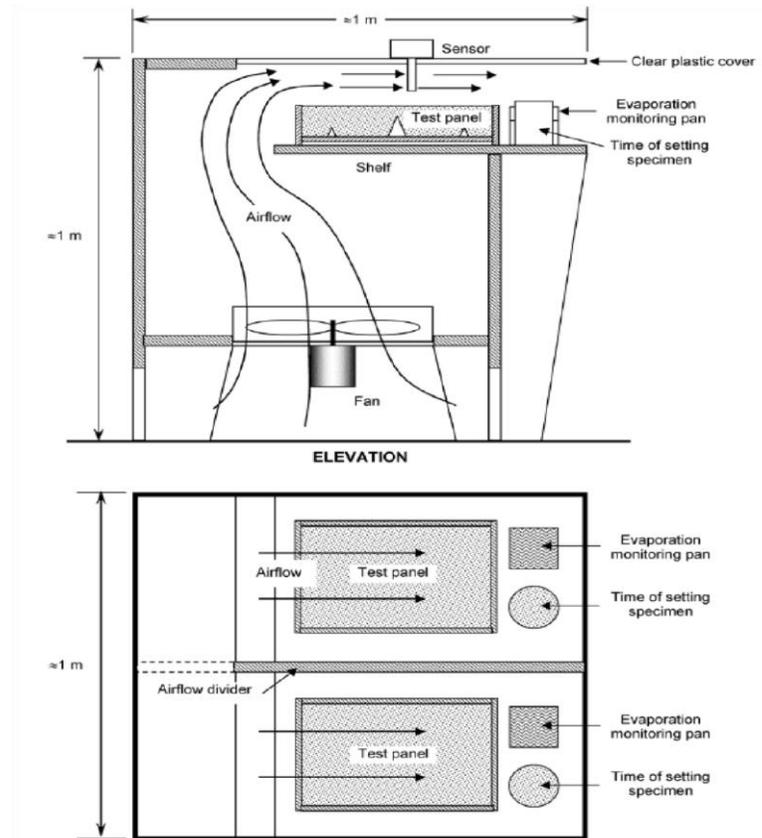
Ventilador de velocidad variable.- El ventilador empleado deberá ser capaz de alcanzar una velocidad de viento de más de 4,7 m/s en el área entera de superficie del panel de prueba.

FIGURA 3.3.3-3 VENTILADOR DE VELOCIDAD VARIABLE



Cámara ambientada.- El uso de una caja como cámara ambiental es un método para producir un flujo uniforme de aire sobre la superficie del panel (Ver Fig. 2). Una cubierta transparente encima los paneles ayudarán en la obtención de flujo de aire uniforme y permitirá la observación del agrietamiento. Otro método de producir un flujo uniforme de aire es usar una cámara ambiental diseñada específicamente como se muestra en la Fig. 3. Un calentador comercialmente disponible, humidificador, y deshumidificador se puede utilizar para mantener la condición ambiental especificada. Esta prueba se lleva a cabo utilizando el aparato mostrado en la Fig. 2 o la Fig. 3 mediante la exposición de los paneles para una velocidad de evaporación de al menos $1,0 \text{ kg/ m}^2 \cdot \text{h}$ (Ver Nota 1). Para la prueba estándar, la temperatura debe mantenerse a $36 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, la humedad relativa debe ser $30 \pm 10\%$, y la velocidad del viento debe ser suficiente para mantener la tasa mínima de evaporación durante la prueba.

FIGURA 3.3.3-4 CAMARA AMBIENTADA



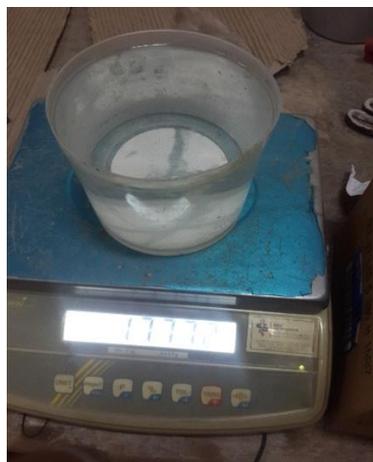
Sensores- Use sensores para medir la temperatura, humedad y velocidad del viento y también para medir la temperatura del aire ambiente y una superficie de hormigón a la más cercana $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa al 1% más cercano, y la velocidad del aire con una precisión de $0,1\text{ m/s}$.

FIGURA 3.3.3-5 SENSORES VELOCIDAD VIENTO, TEMPERATURA Y HR



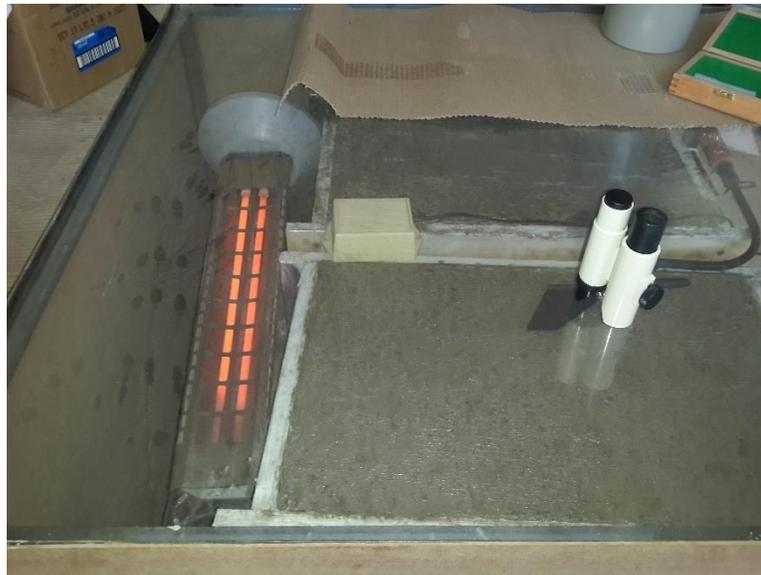
Fuente de Monitoreo.- Se requiere una fuente adecuada para exponer el agua a la corriente de aire para cada panel de prueba de hormigón. La fuente debe ser de tamaño suficiente para exponer al menos $0,1 \pm 0,01\text{ m}^2$ de agua a la corriente de aire. El labio expuesto de la fuente no se extenderá más de 5 mm por encima el nivel de agua en el inicio de la prueba.

FIG. 3.3.3-6 FUENTE PARA DETERMINAR LA TASA DE EVAPORACION



Herramienta de Medición de Fisura.- Un microscopio óptico de mano, comparador de fisuras, o sistema de análisis de imagen se pueden utilizar. La herramienta de medición debe ser capaz de medir un ancho de la fisura de al menos 0,05 mm de la más cercana. Si una imagen automatizada se utiliza para el sistema de análisis, se deberá demostrar para proporcionar una medición precisa. Para demostrar la exactitud de la medición, el sistema se utilizará para medir una muesca de 0,5 mm que está mecanizado en una pieza de acero y el ancho reportado de la muesca debe estar dentro de $\pm 0,05$ mm de la anchura mecanizada.

FIGURA 3.3.3-7 MICROSCOPIO OPTICO



Para hacer el análisis de las patologías que se requieren reducir con el presente estudio se seguirán los siguientes pasos:

- Determinar el asentamiento de cada mezcla de conformidad con Método de prueba cono de abrams. Si el asentamiento es demasiado bajo para una mezcla de hormigón que contiene fibras, utilice el tiempo de flujo a través de un cono de asentamiento invertido para medir la trabajabilidad.
- En un recipiente que de superficie mínima de espejo de agua de 0.01 m² llenar con agua y colocarlo aguas debajo de la cámara ambientada para que a partir de esta se pueda obtener la tasa de evaporación dentro de la cámara.

- Llenar los moldes del panel utilizando una capa. Consolidar el hormigón con vibración externa hasta que el hormigón este nivelado aproximadamente con la parte superior del molde. Enrasar cada muestra perpendicular al elevador de tensión tres veces.
- Después de nivelar, las muestras usando una paleta predeterminado número de pasadas. Si la pérdida de humedad es determinada desde el panel, eliminar cualquier adherencia de hormigón residual en el exterior del molde y pesar cada panel mientras esté en el molde.
- Coloque un panel de mezcla de hormigón reforzado con fibra y un panel de mezcla de control en la cámara ambiental aguas abajo desde el ventilador
- Encienda el ventilador, que ha sido preestablecido para lograr la velocidad del aire para obtener las condiciones de evaporación necesaria. La evaluación de fisuras comienza en este momento.
- Al comienzo de la prueba y a intervalos de 30 min, registrar la temperatura del aire, humedad relativa, y la velocidad de flujo de aire en una ubicación 100 ± 5 mm por encima de cada superficie del panel. Si es requerido por la especificador de pruebas, grabar el momento en el que el primer agrietamiento es observado para cada superficie del panel.
- La tasa de evaporación se determina por pesaje inicialmente de las fuentes de completo monitoreo al inicio de la prueba y en intervalos de 30 min a partir de entonces. Anote la pérdida de masa al 5 g más cercano en cada pesaje. Para determinar la tasa de evaporación durante cada intervalo de tiempo, divide la pérdida de masa entre sucesivos pesajes por la superficie del agua en el platillo y el intervalo de tiempo entre pesadas sucesivas (Ver Nota). La prueba no es válida si la tasa media de la evaporación es menor a $1,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$.

NOTA - Los ajustes a la velocidad del viento debe hacerse si es necesario para mantener la tasa de evaporación en el nivel requerido. Se sugiere que las fuentes de monitoreo se coloquen a escalas continuas en la corriente de aire para el monitoreo sin eliminación periódica durante la prueba. Si esto no es posible, la fuente de

vigilancia se debe quitar de la corriente de aire, se pesa, y devuelto a la corriente de aire dentro de los 15 segundos.

- Después de que ocurra el fraguado final (utilizar la última medida de tiempo para establecer en las dos muestras), registre las variables atmosféricas, se detienen los ventiladores, registran el tiempo y determinan el total de la pérdida de agua de las fuentes de monitoreo. Si la pérdida de humedad del panel es por determinar, pesar los paneles de prueba en sus moldes. Guarde los paneles en el laboratorio a 23 ± 2 °C y bajo láminas de plástico para minimizar la evaporación hasta la hora de la medición de ancho de fisura.

Procedimiento para el desarrollo de los ensayos de Retracción Plástica del hormigón ASTM 1579-06

1.- Partimos preparando la mezcla de hormigón según nuestra dosificación obtenida del cálculo según ACI 211.1, en donde se muestran las cantidades de los materiales tanto para un Hormigón convencional, como para un Hormigón con Fibras de Caucho.

TABLA 3.3.3-2: MATERIALES PARA LA CONFECCION DEL HORMIGON

hora de inicio:	10:50	hora de termino:	17:00:00 AM
Tº del laboratorio (hora de inicio) :	22º	Tº del laboratorio (hora de termino) :	19º
H R Laboratorio (hora de inicio) :	43%	HR Laboratorio (hora de termino) :	48%

DOSIFICACION						HORMIGON CONVENCIONAL	
Materiales	1m3 Arido seco	Absorcion	Humedad	1m3 Arido Humedo	Dosificacion	Temperatura (º)	
Agua (lts)	185.00	-	-	192.53	4.29	17	
Cemento (kg.)	347.09	-	-	347.09	8.05	17	
Grava (kg.)	1096.55	1.66	1.35	1111.37	25.05	17	
Arena (kg.)	746.11	3.35	2.79	766.93	16.99	17	
Agua total (lts.)	185.00	-	-	192.53	4.29	17	

ENSAYOS HORMIGON FRESCO

ENSAYO CONO DE ABRAHAMS		
cono=	5.20	cm

Densidad del Hº Convencional	
2400	kg/m ³

Relacion Agua-Cemento	
A/C=	0.53

DIMENSIONES DEL MOLDE		
alto=	10.5	cm
largo=	57	cm
ancho=	36.5	cm
volumen=	21845.25	cm ³
volumen=	0.02185	m ³
peso molde vacio=	9.895	Kg.
peso molde con hormigon=	62.320	Kg.

2.- Continuamos con la medición de las variables que vamos a controlar, Humedad Relativa, Temperatura, Velocidad del Viento y Tasa de Evaporación.

TABLA 3.3.3 -3: TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA, VELOCIDAD DEL VIENTO Y TASA DE EVAPORACION PROMEDIO.

Diametro del recipiente= 0.20 m **Area del Recipiente=** 0.031416 m²

Hora	Δ min	Δ hora	Peso del Recip. (Inicial)	Peso del Recip. (Final)	Δ Peso del Recip.	Δ Peso del Recip. Acum.	Tasa de Evaporacion
(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(gr.)	(gr.)	(kg.)	(kg.)	(Kg/m ² *h)
10:50	0	0	490.00	487.00	0.0300	0.0300	0.9549
11:20	0:30	0:30	487.00	484.00	0.0300	0.0600	0.9549
11:50	0:30	0:30	484.00	480.77	0.0323	0.0923	1.0285
15:00	3:10	3:10	480.77	477.45	0.0332	0.1255	1.0568
15:30	0:30	0:30	477.45	474.01	0.0344	0.1599	1.0950
16:00	0:30	0:30	474.01	470.75	0.0326	0.1925	1.0377
16:30	0:30	0:30	470.75	467.58	0.0317	0.2242	1.0090
17:00	0:30	0:30	467.58	464.56	0.0302	0.2544	0.9613

Hora	Δ min	Δ hora	HR	T	Velocidad de Viento
(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(%)	($^{\circ}$ C)	(m/s)
10:50	0	0	45	32	5.20
11:20	0:30	0:30	40	33	5.20
11:50	0:30	0:30	38	32.5	5.20
15:00	3:10	3:10	37	34	5.20
15:30	0:30	0:30	41	33	5.20
16:00	0:30	0:30	42	33.5	5.20
16:30	0:30	0:30	42	34.5	5.20
17:00	0:30	0:30	43	32	5.20

3.- Finalmente medimos los anchos de fisura promedio de cada probeta del ensayo, al momento de la aparición de fisura, al final del fraguado y a las 24hrs después del vaciado de la mezcla.

TABLA 3.3.3 -4: MEDICIÓN PROMEDIO DE FISURAS EN LABORATORIO

Hora	Δ min	Δ hora	Tiempo de Aparición de Fisura	Ancho de Fisura a la hora de su aparición	Tiempo de Terminación de Fraguado	Ancho de Fisura al Final del Fraguado	Ancho de Fisura a las 24hrs.
(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(hh:mm)	(mm)	(hh:mm)	(mm)	(mm)
10:50	0	0	-	-	-	-	-
11:20	0:30	0:30	-	-	-	-	-
11:50	0:30	0:30	-	-	-	-	-
15:00	3:10	3:10	11:55	0.23	-	-	-
15:30	0:30	0:30	-	-	-	-	-
16:00	0:30	0:30	-	-	-	-	-
16:30	0:30	0:30	-	-	-	-	-
17:00	0:30	0:30	-	-	16:50	0.62	-
24 hrs después del vaciado				24 hrs después del vaciado			
11:00	24:00:00	24:00:00					0.83

Para todos los paneles obtenemos el ancho de fisura promedio el cual se mide de la media de cada panel tomando en cuenta que esta debe ser mayor a 0.5mm para el caso del hormigón convencional.

A partir de este cuadro vamos a hacer el análisis de la reducción del ancho de fisura el cual se va calcular de manera porcentual en al Capítulo IV de la presente investigación.

TABLA 3.3.3-5: ANCHO DE FISURA PROMEDIO DE CADA PANEL

SERIE	ENSAYO	Ancho de fisura al momento de su aparición	Promedio de Fisura al Momento de su Aparición	Ancho de fisura al Termino del Fraguado	Promedio de Fisura al Termino del Fraguado	Ancho de fisura a las 24 hrs del inicio del ensayo	Promedio de Fisura a las 24 hrs del inicio del fraguado
		mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
1-0.025%	1	0.155	0.15	0.42	0.44	0.54	0.55
2-0.025%	2	1.145		0.45		0.555	
1-0.050%	1	0.16	0.17	0.39	0.4	0.5	0.49
2-0.050%	2	0.169		0.415		0.481	
1-0.100%	1	0.19	0.2	0.33	0.36	0.42	0.44
2-0.100%	2	0.21		0.385		0.468	
1-HC	1	0.21	0.22	0.43	0.41	0.73	0.75
2-HC	2	0.23		0.4		0.77	
3-HC	3	0.245	0.25	0.41	0.42	0.7	0.71
4-HC	4	0.25		0.42		0.72	
5-HC	5	0.22	0.23	0.59	0.62	0.81	0.79
6-HC	6	0.237		0.64		0.78	

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Metodología para el análisis de resistencia en el hormigón

El análisis metodológico que se realizará en el presente trabajo tiene un carácter principalmente de relación y comparación, entre el comportamiento del hormigón ante la resistencia a compresión y las distintas variables o características de sus componentes, que en este caso es la variación por la adición de fibras de caucho.

Se partirá de variables bien definidas que son:

- Resistencia a compresión del hormigón.
- Edad del hormigón

Partiendo de relacionar estas variables, se puede obtener gráficos y ábacos consistentes en curvas ajustadas, que darán una idea real de como es el comportamiento del hormigón, para así poder compararlo con los parámetros de estudio.

Se adoptará una metodología de relación y comparación por ser práctica y demostrativa, para así lograr un mejor entendimiento de cómo se comporta el hormigón ante el esfuerzo de compresión con una variación de hormigón con adición de fibras de caucho en diferentes porcentajes según los planteados en el estudio.

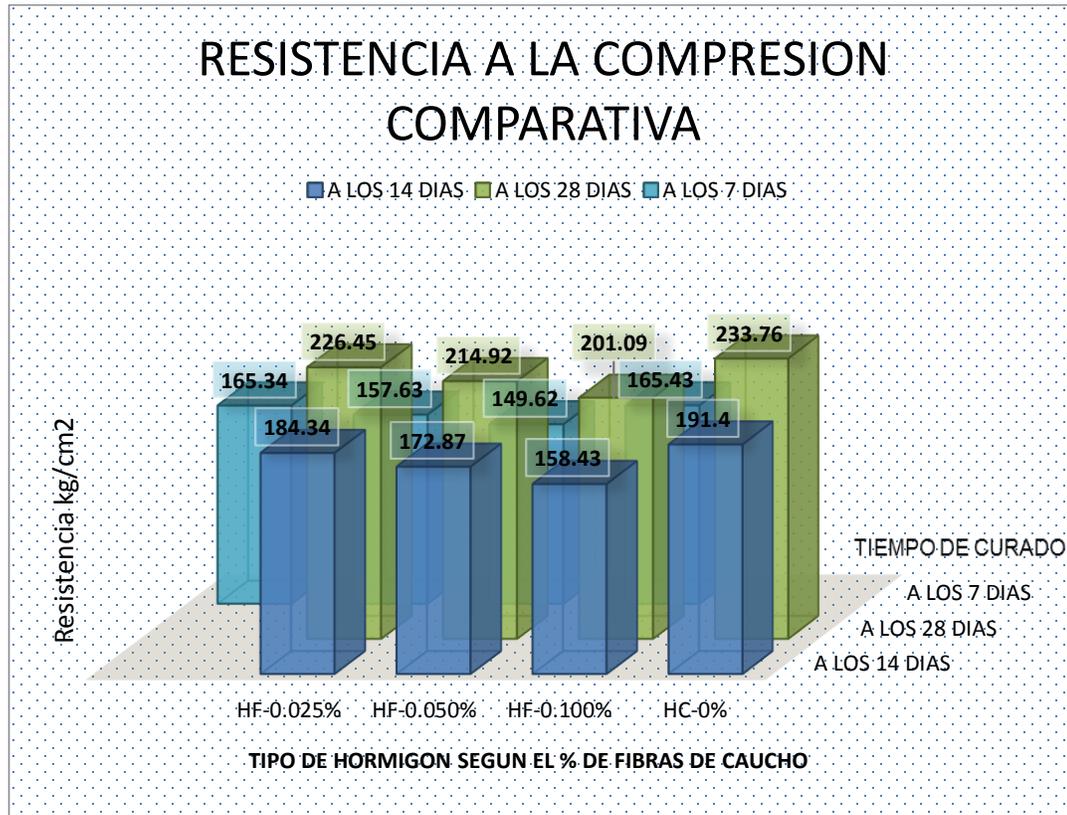
4.2 Comparación de resultados

Análisis de la resistencia a compresión a las diferentes edades planteadas en el estudio

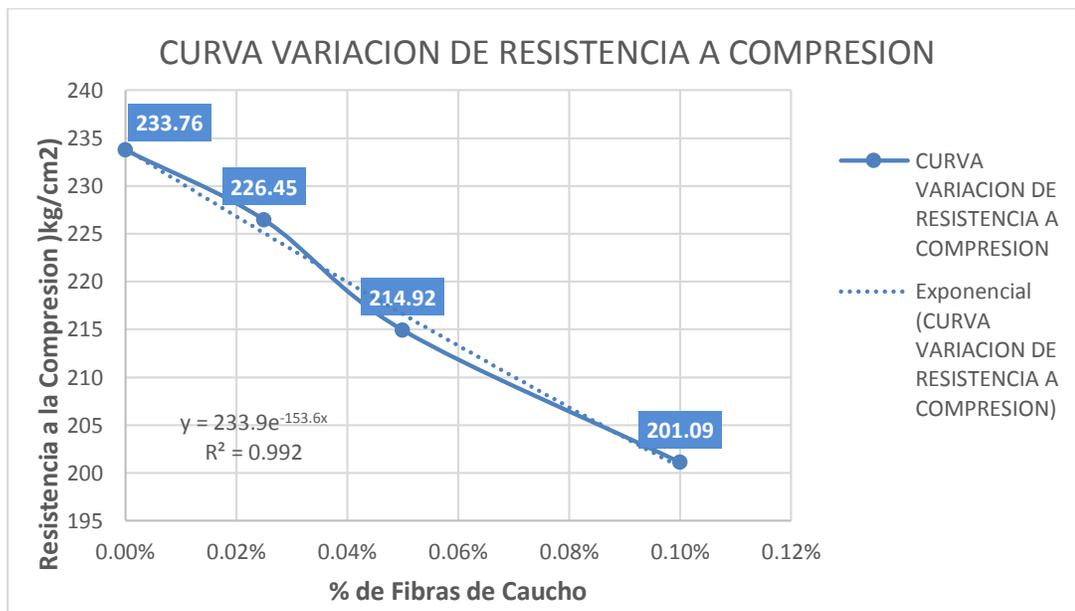
TABLA 4.2-1: RESISTENCIA A COMPRESIÓN VS. EDAD DEL HORMIGÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LAS PROBETAS				
% DE FIBRAS/TIEMPO DE CURADO	HF-0.025%	HF-0.050%	HF-0.100%	HC-0%
A LOS 7 DIAS	165.34	157.63	149.62	165.43
A LOS 14 DIAS	184.34	172.87	158.43	191.4
A LOS 28 DIAS	226.45	214.92	201.09	233.76

FIGURA 4.2-1: PORCENTAJE DE VARIACION DE LA RESISTENCIA



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Primeramente se puede notar que a medida que se incrementa el % de fibras de caucho al hormigón, este disminuye su resistencia de manera exponencial en los siguientes porcentajes:

TABLA 4.2-2: ANALISIS DE REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

PORCENTAJE DE VARIACION DE LA RESISTENCIA A COMPRESION			
HF-0.025%	HF-0.050%	HF-0.100%	HC-0%
3.13%	8.06%	13.98%	0.00%

De tal manera se puede evidenciar que esta disminución de la resistencia principalmente se debe a que la densidad de las fibras es menor que la de los materiales componentes del hormigón.

Por otra parte también la adherencia de la fibras a los materiales componentes del hormigón es menor entre más grande sea el área de la fibra.

Las fibras, al añadirse al hormigón, se dispersan en todo el volumen de éste. Esto confiere a dicha matriz un armado en tres dimensiones en el que las fibras cosen las fisuras del hormigón formando un “puente” entre los áridos gruesos, permitiendo una formación controlada de las fisuras, y llevando al hormigón a un comportamiento dúctil después de la fisuración inicial.

La efectividad de las fibras está relacionada con la capacidad de dispersión, frecuencia de fibra y finura de éstas. Resulta obvio que en función de la dosificación, de las longitudes de fibra y de las propiedades de las mismas se confiere al hormigón propiedades distintas, de esta manera se acentúan más unas propiedades sobre otras en función de los distintos usos y aplicaciones del hormigón reforzado con fibras. Uno de los parámetros más importantes es la relación de aspecto, que es un número

adimensional resultado de la relación entre la longitud de la fibra y su diámetro. Es importante porque a mayor longitud, mayor cantidad de posibles fisuras interceptará. Y, al mismo tiempo, a menor diámetro, mayor cantidad de fibras por unidad de volumen habrá para una dosificación dada.

Con la incorporación de fibras de caucho en el hormigón logramos evitar el fenómeno de spalling, proporcionamos ductilidad al hormigón, cosa que permite absorber energía del impacto, mejoramos también su resistencia residual y el aumento de las características mecánicas del mismo lo que nos permite reducir la fisuración y consecuentemente reducir la permeabilidad del hormigón y con ello la probabilidad de corrosión. Además, las fibras de caucho son una buena solución, pues entre sus múltiples cualidades cabe destacar que son químicamente inertes, a prueba de corrosión, a diferencia de las fibras de acero.

FIGURA 4.2-3: COMPARACION DE FISURA PROMEDIO

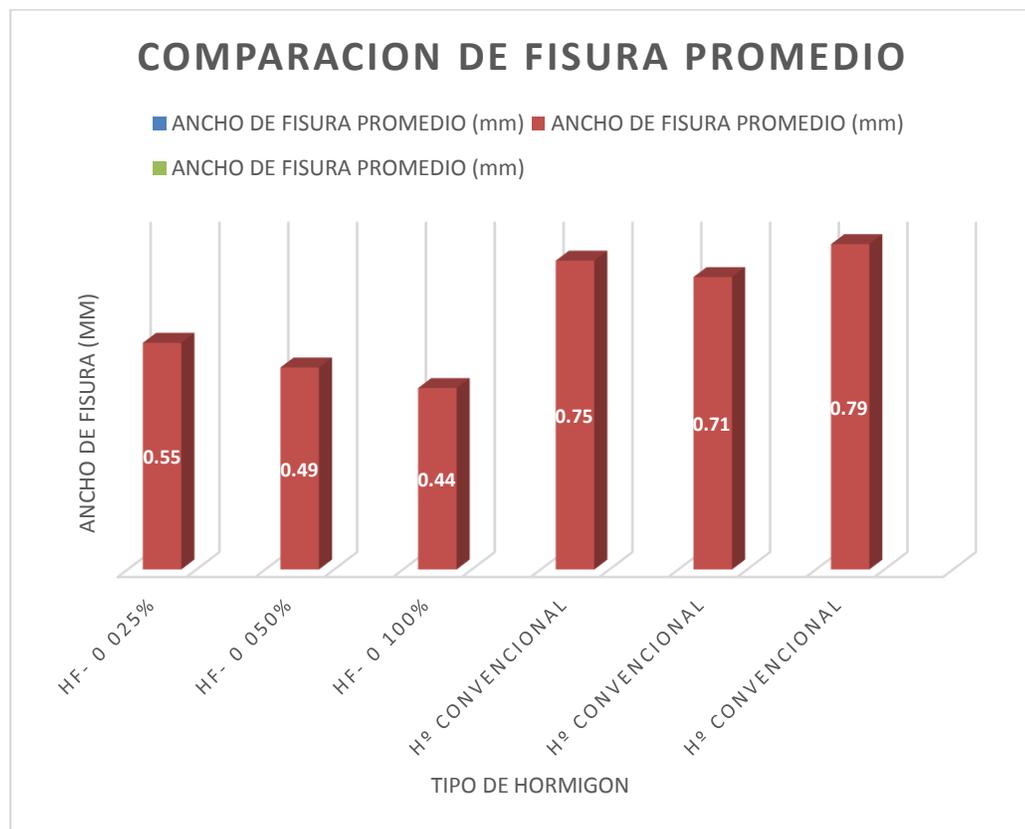
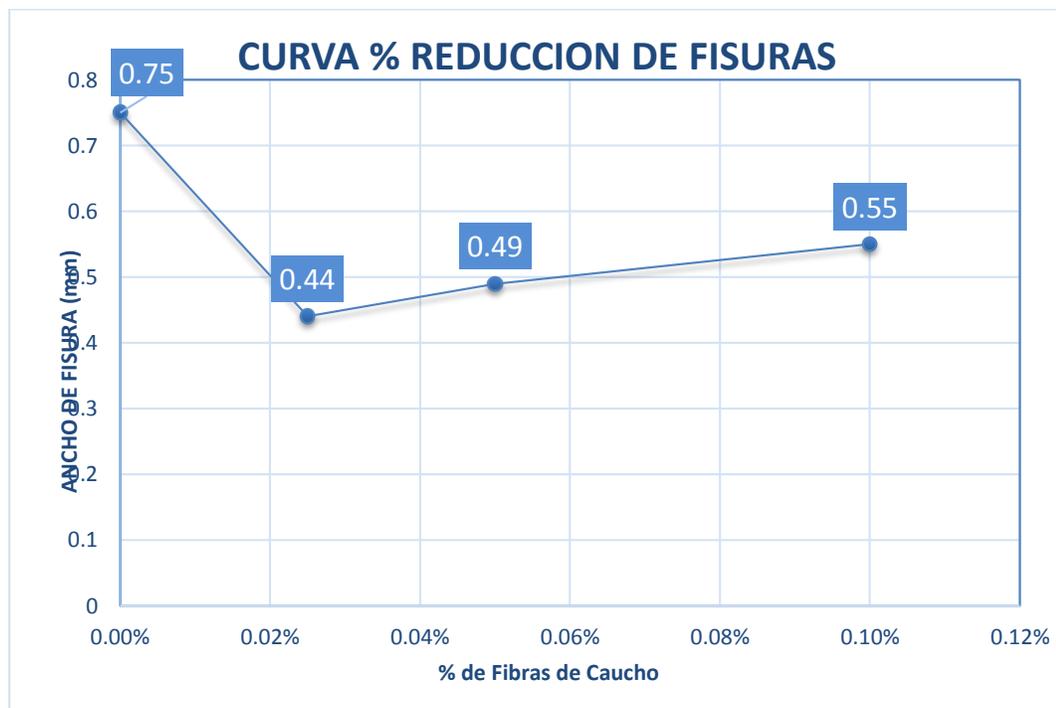


TABLA 4.2-3: PORCENTAJE DE REDUCCION DE FISURAS

Identificación de Mezcla	Volumen de Fibra	Número de Paneles	Ancho de Fisura	Desviación Estándar de Ancho de Fisura	RELACION DE REDUCCION DE FISURAS
			Promedio (mm)	Promedio (mm)	Promedio (%)
B	0,025% de fibra	2	0.55	0,04	26.67
C	0,050% de fibra	2	0.49	0,05	30.99
D	0,100% de fibra	2	0.44	0,05	44.30
A	0.00% de fibra	6	0.75	0,04	-

FIGURA 4.2-4: CURVA ANCHO DE FISURA VS. % DE FIBRAS DE CAUCHO



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de fisuración, se puede evidenciar que se pudo reducir el ancho de fisuras en función a un hormigón sin refuerzo de fibras, en porcentajes de hasta 44.30% con una dosificación de 0.100% de fibras de caucho.

Esto se debe principalmente a que las fibras van a hacer refuerzo a la matriz del hormigón en el estado plástico que se dan en las primeras 6 horas en donde el hormigón pierde humedad rápidamente en la superficie debido a los factores externos como la temperatura y el viento, entonces las fibras van a reforzar y disminuyen las tensiones que se generan en la mezcla.

La adición de fibras de caucho supone una mejora de la tenacidad, y por tanto su aptitud para resistir fracturas. La energía absorbida, aumenta con la cuantía de fibras presente en el hormigón, así al doblar la cuantía de fibras, se dobla también el incremento de energía absorbida, sin que el tipo de fibra constituya, para las cuantías escogidas, un parámetro diferenciador.

Respecto a las losas de control, podemos decir que la adición de fibras supone un aumento del número de fisuras, disminución de la separación entre éstas y consecuentemente un menor ancho de fisura, lo que incide directamente en el control de la fisuración. Ello supone una importante mejora de la permeabilidad del hormigón, que podemos relacionar con la durabilidad de los elementos, pues se aumenta la resistencia a la rápida penetración de la carbonatación.

4.3 Análisis de costos de producción.

ANALISIS DE COSTOS DEL HORMIGON CONVENCIONAL VS. HORMIGON CON FIBRAS DE CAUCHO

COSTO DE PRODUCCION					
HORMIGON CONVENCIONAL					
N°	Ingrediente	UNID.	CANTIDAD	P.U.	COSTO (bs.)
1	Cemento	Bolsa	1	55	55
2	Arena	m3	1	120	120
3	Grava	m3	1	120	120
TOTAL					295

Bs.

Fuente: Elaboración Propia.

COSTO DE PRODUCCION					
HORMIGON CON FIBRAS DE CAUCHO					
N°	Ingrediente	UNID.	CANTIDAD	P.U.	COSTO (bs.)
1	Cemento	Bolsa	1	55	55
2	Arena	m3	1	120	120
3	Grava	m3	1	120	120
4	Fibras de Caucho	ton	1	6300	6300
TOTAL					6595

Bs.

Las fibras de caucho se encuentran en toneladas en los depósitos de trituración ubicados en Santa Cruz, Cochabamba y La Paz, el cual en función a la cantidad solicitada varía el precio y la puesta en el lugar del pedido. El precio por tonelada oscila entre 4900 Bs. y 5600 Bs. y llegamos hasta 6300 Bs. Mas costos de transporte para la puesta en obra.

COSTO POR UNIDAD			
HORMIGON CONVENCIONAL			
N°	Ingrediente	UNID.	Precio Unitario (Bs.)
1	Cemento	kg	1.1
2	Arena	kg	0.12
3	Grava	kg	0.12

COSTO POR UNIDAD			
HORMIGON CON FIBRAS DE CAUCHO			
N°	Ingrediente	UNID.	Precio Unitario (Bs.)
1	Cemento	kg	1.1
2	Arena	kg	0.12
3	Grava	kg	0.12
4	Fibras de Caucho	kg	6.3

Fuente: Elaboración Propia

Costo para 1m³ de hormigón convencional vs. Hormigón con fibras de caucho

COSTO DE PRODUCCION VOLUMEN (1m3) DE HORMIGON					
HORMIGON CONVENVIONAL					
N°	Ingrediente	UNID.	CANTIDAD	P.U.	COSTO (bs.)
1	Cemento	kg	347.09	1.1	382
2	Arena	kg	1096.55	0.12	132
3	Grava	kg	746.11	0.12	90
TOTAL					604

Bs.

COSTO DE PRODUCCION					
HORMIGON CON FIBRAS DE CAUCHO 0.025%					
N°	Ingrediente	UNID.	CANTIDAD	P.U.	COSTO (bs.)
1	Cemento	kg	347.09	1.1	382
2	Arena	kg	1096.55	0.12	132
3	Grava	kg	746.11	0.12	90
4	Fibras de Caucho	Kg	2.5	6.3	16
TOTAL					620

Bs.

COSTO DE PRODUCCION					
HORMIGON CON FIBRAS DE CAUCHO 0.025%					
N°	Ingrediente	UNID.	CANTIDAD	P.U.	COSTO (bs.)
1	Cemento	kg	347.09	1.1	382
2	Arena	kg	1096.55	0.12	132
3	Grava	kg	746.11	0.12	90
4	Fibras de Caucho	kg	5	6.3	32
TOTAL					636
Fuente: Elaboración Propia					

Bs.

COSTO DE PRODUCCION					
HORMIGON CON FIBRAS DE CAUCHO 0.025%					
N°	Ingrediente	UNID.	CANTIDAD	P.U.	COSTO (bs.)
1	Cemento	kg	347.09	1.1	382
2	Arena	kg	1096.55	0.12	132
3	Grava	kg	746.11	0.12	90
4	Fibras de Caucho	kg	10	6.3	63
TOTAL					667

Bs.

Fuente: Elaboración Propia

Todos los montos de cada porcentaje están en función a 1m³ de hormigón según los pesos obtenidos de la dosificación según ACI 211.

DIFERENCIA FINAL ENTRE HC VS. H FIBROREFORZADO

COMPARACION DE COSTOS				
N°	CARACTERISTICA	VARIACION		
		COSTO (Bs.)	DIF.	En %
1	HORMIGON CONVENCIONAL	604	0	0
2	HORMIGON CON 0.025%	620	16	2.65%
3	HORMIGON CON 0.050%	636	32	5.30%
4	HORMIGON CON 0.100%	667	63	10.43%

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que la variación de costos no es significativa en función a la mejora que puede dar la aplicación de las fibras de caucho como refuerzo para el hormigón.

En síntesis y haciendo una comparación con la adición de otro tipo de fibras el costo es menor lo cual nos da una alternativa para el uso de este tipo de fibras en la mezcla de hormigón.

A comparación del uso de aditivos se nos abarata los costos para la reducción de la fisuración por Retracción Plástica.

4.4 Características generales de los componentes del hormigón

Los componentes de las mezclas de hormigón (cemento, arena, grava, agua y fibras de caucho) que intervinieron en las pruebas, son materiales convencionales que se encuentran en nuestro medio, cuyas características y valores están dentro de las especificaciones necesarias (manual de la A.S.T.M), por lo que se considera confiable relacionar cualquier valor de alguna característica presentada en las planillas, con la resistencia y el comportamiento del hormigón.

4.4.1 Evaluación de las resistencias a compresión y análisis de fisuraciones

Después de realizados los ensayos podemos observar que la dosificación realizada es adecuada para las características de los materiales empleados, ya que la resistencia a compresión del hormigón patrón es superior a la de resistencia de diseño esperada. Asimismo se observa la aplicabilidad de dicha dosificación para el hormigón fibras de caucho en diferentes proporciones, obteniendo una reducción gradual de la resistencia a compresión, para el caso de la resistencia los valores mínimos superan a la mínima resistencia a compresión requerida.

Como se nombró anteriormente, esta dosificación fue posible tomando criterios estipulados, y de laboratorio, volviendo constantes algunas variables.

En los que se refiere a los resultados en el análisis de fisuraciones, se observa que en función a la cantidad de fibra de caucho que se adiciona en el hormigón es mayor o menor la reducción de la fisura, pero en lo que se refiere a la resistencia a compresión es menor en cuanto mayor sea la cantidad de fibras de caucho aplicada.

4.4.2 Diferencia entre resultados obtenidos y esperados

Luego de analizar todo lo referente al hormigón con fibras de caucho se puede hacer una evaluación de los resultados obtenidos en laboratorio con los que se pudieron encontrar en bibliografía y que constituyeron los criterios para la dosificación.

En cuanto a la resistencia del hormigón partimos con los parámetros de bibliografía donde se nos indica que ésta puede variar de acuerdo al tipo de hormigón que se quiera lograr de acuerdo al Código Boliviano del Hormigón a partir de los 210 kg/cm^2 que es

el rango que se estableció para este estudio, la resistencia a compresión a los 28 días para el hormigón patrón es 233,76 kg/cm² y para el hormigón con fibras de caucho varía entre 226,76 y 201,09 kg/cm², que, comparándola con el rango establecido se encuentra dentro de valores esperados y planteados en la hipótesis de este estudio.

Si bien se pudo verificar que al aplicar las fibras de caucho se reducen los anchos de fisura, también se pudo observar que la resistencia a compresión disminuye por lo cual no es recomendable aplicar mayores dosis que las estudiadas en el presente trabajo de investigación.

4.5 Análisis de la trabajabilidad en las mezclas de hormigón

Según la experiencia que se tuvo en el vaciado de probetas para el presente estudio, con respecto a la trabajabilidad se puede decir que se tuvo una mezcla bien trabajable para el hormigón patrón debido a que las propiedades de los agregados, la cantidad de agua y cemento fueron las adecuadas, siendo de la misma manera trabajable las mezclas con fibras de caucho ya que al ser fibras cortas y de un espesor mínimo no se tuvo inconvenientes a la hora de adicionarlas a la mezclas teniendo una trabajabilidad normal.

4.6 Aplicabilidad del trabajo de investigación

Aplicación pavimentos industriales, aeroportuarios, carreteras y aplicaciones especiales.

Los pavimentos industriales, portuarios, aeroportuarios, carreteros y otros, son técnicamente considerados como losas apoyadas sobre el suelo sometido a cargas puntuales, distribuidas o lineales y son tradicionalmente reforzados para efectos de retracción y temperatura y, adicionalmente, pueden ser reforzados para la flexión cuando el nivel de la carga lo exija. Existen casos donde el diseño del pavimento no involucra algún refuerzo, como para los pavimentos peatonales y las áreas de estacionamiento.

El comportamiento mecánico de las losas apoyadas sobre suelo, a través de los diferentes tipos de cargas a los cuales puedan estar sometidos, es compatible con el nivel de esfuerzos resistentes que pueden ser ofrecidos por el hormigón fibroreforzado. La tecnología del hormigón fibroreforzado ha tomado un auge técnico muy importante. En la última década, los métodos de análisis y de comportamiento del material han sido desarrollados para la correcta modelación de estas aplicaciones. Se ha generado un incremento sustancial de esta tecnología y desarrollado investigaciones y normativas para el diseño que demarcan la responsabilidad estructural de este nuevo material.

En los siguientes párrafos del presente capítulo serán explicadas en detalles las posibilidades técnicas que ofrece la tecnología del hormigón fibroreforzado en comparación con las metodologías tradicionales.

FIGURA 4.6 -1: APLICACIÓN DE HORMIGONES SUPERFICIALES



Foto 6.1 - Ejemplo de aplicación en aeropuertos.



Foto 6.2 - Ejemplo de aplicación en estacionamientos.



Foto 6.3 - Ejemplo de aplicación en piso industrial.



Foto 6.4 - Ejemplo de aplicación en puertos.

En la actualidad, lo que se refiere al caucho de desechos de gomas usadas en nuestra ciudad es netamente un material de desecho de todos las personas, que en general no es comercializado y empleado para otros usos ecológicos, más al contrario algunas personas al ver el material de caucho viejo e inservible lo proceden a quemar y botarlos

a los basureros, lo cual provoca una seria contaminación del medio ambiente en el que vivimos.

A partir de este trabajo de investigación se puede proponer aplicaciones al tipo de hormigón planteado, de acuerdo al objeto del estudio.

Basándose en el comportamiento de las mezclas se puede recomendar su empleo en elementos superficiales fibroreforzados como los planteados anteriormente, en losas, pavimentos rígidos, elementos estructurales especiales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Con el estudio realizado se demuestra que el hormigón con refuerzo de fibras de caucho reúne las propiedades físicas y mecánicas necesarias para poder ser una alternativa del hormigón convencional.
- De acuerdo a los ensayos de laboratorio realizados a los agregados (grava y arena), se establece que son materiales de calidad, de acuerdo a las especificaciones, parámetros y tolerancias que sigue la ASTM y el CBH 87, validando el estudio y resultados obtenidos.
- Debido a los controles realizados en la elaboración, se logró obtener mezclas homogéneas, lo cual es muy importante en este tipo de hormigones, ya que de no ser así la mezcla puede presentar segregación de materiales, ocasionando una mala resistencia.
- Las ventajas que presenta el hormigón con refuerzo de fibras de caucho, es que se aplicaran las fibras para reducir las fisuraciones provocadas por la débil resistencia a la tracción que tiene el hormigón a temprana edad, por lo que la fibra actúa como un refuerzo en la matriz del hormigón proporcionando un refuerzo a las reacciones que se generan en el hormigón por efectos de viento, temperatura y pérdida de humedad superficial, sólo podrán ser aprovechadas siguiendo un proceso adecuado en su elaboración, aplicación y se cumplan las especificaciones de construcción.
- Habiendo realizado la comparación del hormigón con fibras de caucho con un hormigón convencional, se observa que la resistencia a compresión disminuye en cuanto mayor sea el porcentaje de fibras de caucho aplicado al mismo, ya que se obtuvieron variaciones de 3.13% ,8.06% y 13.98% aplicando 0.025%, 0.050% y 0.100% de fibras respectivamente.
- En lo que se refiere a la resistencia al fuego de la mezcla con fibras de caucho, se puede observar que en función a sus propiedades físicas y mecánicas, las fibras de caucho tienen una baja resistencia a altas temperaturas, ya que a partir

de los 100° las fibras se ablandan y sufren alteraciones permanentes, es decir que se generan porosidad en el hormigón y esto puede llegar a afectar por que deja expuesto al hormigón a ataques químicos y de oxidación a la armadura.

- En lo que se refiere al análisis que se hizo de las fisuraciones tanto con el hormigón convencional como así también con el hormigón con fibras de caucho, se pudo evidenciar que tiene una disminución de 26.67%, 30.99% y 44.30% aplicando 0.025%, 0.050% y 0.100% de fibras respectivamente en lo que se refiere al ancho medio de las fisuras presentadas en los ensayos, por lo cual se puede concluir que se llevó a cabo el estudio logrando los objetivos planteados en la investigación.
- El reciclado y recauchutacion de materiales de deshecho tales como el caucho usado, como material de construcción, reduce el acopio de materiales considerados basura, colaborando con el medio ambiente y el impacto que genera al mismo los depósitos de estos materiales.
- La fabricación de hormigones a partir de residuos es un buen método para valorizar los mismos y evitar el despilfarro de materia prima que supone el vertido indiscriminado de estos como quema de los mismos y la contaminación.
- Se demostró la hipótesis planteada en un principio, la reducción porcentual de los anchos de fisura de distintos tipos de mezcla de hormigón con fibras de caucho y la obtención de una resistencia a compresión aplicada y que se encuentre dentro de normas establecidas y estandarizadas para nuestra región, con lo que se comprueba que el hormigón con fibras de caucho es una alternativa para los hormigones convencionales.
- Con la incorporación de fibras de caucho en el hormigón logramos evitar el fenómeno de spalling, proporcionamos ductilidad al hormigón, cosa que permite absorber energía del impacto, mejoramos también su resistencia residual y el aumento de las características mecánicas del mismo lo que nos permite reducir la fisuración y consecuentemente reducir la permeabilidad del hormigón y con ello la probabilidad de corrosión. Además, las fibras de caucho

son una buena solución, pues entre sus múltiples cualidades cabe destacar que son químicamente inertes, a prueba de corrosión, a diferencia de las fibras de acero.

- Finalmente podemos decir que el hormigón con fibras de caucho tiene menor porcentaje de absorción, ya que las fibras son impermeables lo cual se puede tomar como un aislante a los ataques del agua, también cabe destacar que con la adición de las fibras de caucho el hormigón adquiere mayor resistencia a la abrasión, esto sobre todo en elementos superficiales como pavimentos y puentes en donde se tiene circulación de vehículos los cuales producen desgaste en la capa de rodadura.

Recomendaciones

- Si bien, la norma ASTM C 1579 fue desarrollada para estandarizar un procedimiento de ensayo que permite evaluar la efectividad de la adición de fibras en el control de la fisurabilidad de un hormigón, durante la etapa de endurecimiento inicial, en la presente investigación se ha hecho extensivo de esta metodología para la evaluación de la influencia de otras variables, como la proporción y porcentaje de fibras de caucho incorporadas al hormigón y la variación del método de elaboración de la mezcla, en el comportamiento del hormigón, específicamente en su fisurabilidad frente a condiciones severas de secamiento.
- La experimentación realizada con este método de ensayo puede ser considerada como factible y válida, en cuanto a sus características de reproducibilidad, en la medida que se logre que los hormigones que se comparan en cada ensayo tengan un proceso de elaboración que no implique un desfase significativo en cuanto a su madurez al momento de ser expuestos a las condiciones de secamiento, en la cámara. En este estudio, debido a que no se pudo confeccionar ambas probetas al mismo tiempo, por no contarse con dos procesos de elaboración de hormigón que fueran relativamente simultáneos, se debió confeccionar los hormigones por separado dejando una variable temporal difícil de controlar por los tiempos de preparación requeridos, especialmente en este caso, que contemplaba métodos distintos de mezclado, en una y dos etapas. Es por ello que se sugiere para un próximo estudio, comparar variables en que el tiempo de mezclado no interfiera las condiciones de exposición, tanto en el instante de partida como en el proceso de mezclado.
- Por los resultados obtenidos en los ensayos, se considera que sería necesario aumentar el número de repeticiones que establece la norma, por lo menos a tres repeticiones, en cada unidad de muestreo, si el estudio incorpora variables distintas a las que se consideran en el método original de la norma. Variables

como ancho de fisura, u otras como ponderaciones del ancho de ésta, pueden no ser suficientes debido a que las fisuras no siempre se comportan de la misma forma, pudiéndose encontrar fisuras del largo completo en las losetas de estudio, como otras entrecortadas que no eran comparables entre sí.

- Adoptar el procedimiento adecuado para el pesaje de los componentes de las mezclas, para no tener mucha variación en los resultados y asimismo reducir los errores accidentales en laboratorio.
- Ejecutar de forma precisa los pasos indicados en el método de dosificación del hormigón, sea el método que fuere.
- Las probetas deben ser almacenadas en un lugar apartado, que esté libre de movimientos e impactos y así lograr que transcurra su etapa de fraguado sin alteraciones.
- El manejo y procesamiento de datos debe ser consistente, se debe analizar toda la información obtenida, para poder expresarlos de forma clara tanto analítica como gráficamente.
- Se recomienda el reciclado del caucho a partir de los desechos de los vehículos de la ciudad o provenientes los desechos de las personas, a partir de distintos procesos como la selección del material, la trituración y reducción de partículas entre límites de normas estándar y la posterior clasificación del material, generando un tipo de agregado que en un futuro se pueda comercializar en nuestro medio para que su producción y utilización sea sostenible.

