

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
CIVIL

“CONCRETO REFORZADO CON FIBRA NATURAL
DE ORIGEN ANIMAL (PLUMAS DE AVES)”

PROYECTO DE TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR
HERBERT ROJAS SILVA SANTISTEBAN

LIMA – PERÚ

2009

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

1.2 Parámetros

1.3 Principios teóricos

CAPÍTULO II: DE LOS MATERIALES

2.1 Cemento

2.2 Agregados

2.3 Agua

2.4 Aditivo

2.5 Fibras

CAPÍTULO III: ENSAYOS REALIZADOS

3.1 ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

- 3.1.1 Medición del asentamiento (Slump)
- 3.1.2 Determinación del peso unitario y rendimiento
- 3.1.3 Medición del contenido de aire (%)
- 3.1.4 Medición de la temperatura
- 3.1.5 Muestreo de probetas
- 3.1.6 Muestreo de vigas

3.2 ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

- 3.2.1 Determinación de la resistencia a la compresión
utilizando especímenes cilíndricos
- 3.2.2 Determinación de la resistencia a la flexión
utilizando especímenes prismáticos

3.3 ENSAYO DE POTENCIAL DE FISURACIÓN

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

DEDICATORIA

A mis padres, María Luisa Silva Santisteban Arriola y Herbert Rojas Zevallos por su amor y comprensión.

A la Mita por iluminar mis pasos.

A mi familia.

AGRADECIMIENTO

A Unión de Concreteras S.A (UNICON) por todo el apoyo técnico brindado, en especial al Ingeniero Enrique Pasquel Carbajal y a Ronald Sotomayor Sánchez.

A Sika Perú, en especial a los ingenieros Patricio Arellano y Johnny Rosas Rafael por el apoyo brindado.

A los ingenieros Mercedes Neyra Palomino, Diana Olaguivel Guimarey, Julio Gómez Silva, Francisco Escuadra Galindo y Said Chávez Monge por su amistad y por transmitirme sus conocimientos con sabiduría.

A las ingenieras Enriqueta Pereyra Salardi y Liliana Chavarría Reyes por la confianza depositada en mi y por guiarme en el desarrollo de este proyecto.

A la ingeniera Elsa Carrera Cabrera por ayudarme a dar el primer paso en esta empresa.

A los técnicos Richard Lino, David Gamarra, Edgar Saavedra, Juan Carlos Álvarez, Cesar Huamán, Ernesto Huamán, Michael Chávez y Julián Pérez por el apoyo brindado.

INTRODUCCIÓN

Sabemos que el concreto es un material que está sujeto a cambios volumétricos de acuerdo a la temperatura de exposición, siendo el más frecuente el caso de la contracción por secado en las primeras horas de fraguado para el cual es necesario el uso de fibras sintéticas y naturales para reducir el efecto.

Es por ello que en esta investigación se pretende analizar y determinar si las plumas de aves eran capaces de inhibir la fisuración en losas de concreto. Para esto se realizó un análisis comparativo entre fibra sintética (Fibermesh) y fibra natural de origen animal (plumas de aves), las cuales se estudiaron en dos ensayos normados por la ASTM y una prueba experimental.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un concreto estándar ($f'c= 175 \text{ kg/cm}^2$) adicionado con plumas de aves como reemplazo de fibras sintéticas que reduzca la fisuración en losas. Logrando además que este concreto sea una alternativa económicamente más accesible por su bajo costo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Determinar el contenido óptimo de las fibras en el concreto tomándose en cuenta la inhibición de las fisuras causadas por la contracción plástica.

- ❖ Estudiar las propiedades del concreto endurecido utilizando fibra sintética (Fibermesh) y fibra natural de origen animal (Pluma de aves).

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

A lo largo de los años ha sido una práctica común el uso de fibras para mejorar las propiedades del concreto como la resistencia y la durabilidad. Avances en investigación y tecnología han obtenido óptimos diseños para concretos reforzados con fibras pero su aplicación comercial aun está limitada debido a que estas fibras incrementan el costo. Un concreto que use fibras naturales podría ser barato y además tendría un impacto ambiental positivo.

Además, son posibles de obtener a un bajo costo haciendo uso de la mano de obra disponible en la localidad y las técnicas para su obtención. Estas fibras son llamadas típicamente naturales no procesadas.

Sin embargo, las fibras naturales pueden ser procesadas químicamente para mejorar sus propiedades. Estas fibras son generalmente derivadas de la madera pero estos procesos son altamente industrializados y no se

dispone aun en países en desarrollo. A tales fibras se les conoce como fibras naturales procesadas.

Un tipo de fibra natural que al parecer tiene un futuro prometedor son las plumas de aves. Las plumas que son desperdicio de la cadena de producción de pollos en el mundo han incrementado el desperdicio en la tierra y están causando problemas ambientales ya que están siendo incineradas.

1.2 Parámetros

El diseño de la mezcla se realizó con cemento Pórtland Sol Tipo I, para una relación A/C igual a 0.70, y con dos clases de fibras: fibra sintética (Fibermesh) y fibra natural de origen animal (plumas de aves) las cuales fueron adicionadas al concreto en dosis de 300, 500, 900 y 1200 g/m³.

1.3 Principios teóricos

Los cambios volumétricos constituyen uno de los aspectos más importantes del comportamiento del concreto, tanto desde el punto de vista de la tecnología del diseño de mezclas, su producción, colocación y

curado, como desde la perspectiva del diseño estructural, dado que sus efectos se traducen en contracciones y/o expansiones que ocasionan una gran variedad de problemas, asociados principalmente a fisuraciones y deformaciones que algunas veces sólo son objetables desde el punto de vista estético, y en otras ocasionan la pérdida de capacidad portante y/o la alteración de las condiciones de uso y operatividad de las estructuras.

Desde hace muchos años se han venido investigando mundialmente las causas y los efectos, principalmente en forma cualitativa, ya que la complejidad de los parámetros involucrados y la dificultad de correlacionar estudios a escalas de laboratorio, con el comportamiento de las estructuras in situ, limitan las posibilidades de establecer criterios cuantitativos generales.

Es frecuente en nuestro medio, el encontrar en los diferentes proyectos, problemas de fisuración, problemas de tipo constructivo y de diseño estructural, derivados de los cambios volumétricos en el concreto, y que en muchos de los casos no son adecuadamente identificados y evaluados en cuanto a sus causas y trascendencia, originándose discrepancias técnicas

y hasta de tipo legal por desconocimiento de los mecanismos que controlan estos comportamientos.

La gran variedad de condiciones ambientales de nuestro país, así como la variabilidad de materiales, técnica constructiva y desarrollo tecnológico de las diferentes regiones, hace necesario el difundir los conceptos básicos relativos a este tema e intercambiar las experiencias científicas y prácticas que definitivamente posee una gran cantidad de nuestros profesionales.

1.3.1 Fenómenos causantes de los cambios volumétricos

Los principales fenómenos que condicionan los cambios volumétricos del concreto están relacionados básicamente con el comportamiento de la pasta de cemento y su interacción con los otros elementos involucrados, como son los agregados, el agua, los aditivos, y las condiciones particulares del entorno, tales como características ambientales de humedad, temperatura, viento, así como los grados de restricción a la deformación de las estructuras, las peculiaridades del diseño estructural y los procesos constructivos.

Estos fenómenos se pueden sintetizar en los siguientes rubros:

I. Contracción o retracción

II. Cambios térmicos

III. Flujo o fluencia

IV. Agresividad química interna y externa

Ahondaremos en I y II por ser de relevancia para comprender el fenómeno estudiado en este proyecto de investigación.

1.3.1.1 Contracción o retracción

Es una de las causas más frecuentes de cambios volumétricos y a la que se asocia muchas veces de manera injustificada problemas de fisuración que son debidos a otras razones que veremos más adelante.

Llamada con frecuencia contracción o retracción de fragua o de fraguado, no es la calificación más correcta, ya que esta denominación sólo abarca una parte del fenómeno que tiene hasta tres manifestaciones:

I. Contracción intrínseca o espontánea

II. Contracción por secado

III. Contracción por carbonatación

1.3.1.1.1 Contracción intrínseca o espontánea

Es la que constituye la verdadera contracción de fraguado, producto del proceso químico de hidratación del cemento y su propiedad inherente de disminuir de volumen en este estado.

El mecanismo de este proceso es físico-químico, en que al mezclarse el cemento con el agua y obtenerse el gel del cemento, se inicia el proceso de hidratación así como la formación de los poros del gel y poros capilares. El intercambio del agua contenida en los poros del gel y los poros capilares con el cemento aún no hidratado, es el responsable del cambio del volumen total de la pasta, y consecuentemente el volumen absoluto del cemento hidratado es siempre inferior al correspondiente al de las sales anhidras y el agua. Esta retracción es irreversible y no depende de los cambios de humedad posteriores al proceso de hidratación y endurecimiento.

La retracción espontánea depende exclusivamente del tipo y características particulares del cemento empleado por lo que cada cemento tiene un comportamiento singular frente a este fenómeno.

El orden de magnitud de la deformación unitaria atribuida a la contracción intrínseca oscila entre 10 y 150 x 10⁻⁶ dependiendo del cemento en particular aunque lo usual es que no sea mayor de 30 x 10⁻⁶.

En términos generales, no produce fisuración pues las tracciones que genera son bajas (2 a 8 kg/cm² salvo el caso de cementos particularmente excepcionales), y se desarrollan a lo largo del tiempo que demora en completarse el proceso de hidratación total del cemento, que como sabemos, se completa en gran medida a los 28 días de edad, pero continúa luego casi de manera indefinida.

En consecuencia, no es apropiado el decir como se hace con frecuencia que la causa principal de fisuraciones en el concreto es debido a la "contracción de fragua " o " contracción de fraguado " ya que está comprobado en forma fehaciente que este fenómeno no motiva

agrietamiento en el concreto, dadas las condiciones estandarizadas de fabricación de los cementos Pórtland modernos que aseguran un comportamiento estable en este aspecto, y los esfuerzos de tracción mínimos que se generan, que son asimilables sin problemas por el concreto.

Consideramos que la causa de la confusión en cuanto a atribuírsele tradicionalmente a este fenómeno la paternidad de cuanto problema de fisuración se detectaba, se debe a que hace algunos años no se había investigado a profundidad en forma cuantitativa este mecanismo, ni los otros que actúan simultáneamente en el concreto ocasionando cambios volumétricos, por lo que se tergiversaban cualitativamente los conceptos, asignándosele a la contracción por fraguado una trascendencia mayor de la que realmente tiene. Si a esto le sumamos la falta de difusión de los resultados y conclusiones de las investigaciones científicas que se han ido efectuando al respecto, se llega pues a la situación de contar con una gran cantidad de colegas y estudiantes que aún mantienen ese criterio ya superado científicamente.

1.3.1.1.2 Contracción por secado

Este fenómeno se produce por la pérdida de humedad de la pasta debido a la acción de agentes externos como son la temperatura, viento, humedad relativa, etc. que propician la evaporación del agua y el secado.

El mecanismo es físico, causado por la pérdida primero del agua contenida en los poros capilares, cuyo efecto es despreciable en términos prácticos y luego por la evaporación del agua de absorción contenida en los poros del gel.

Mantenida por fuerzas electro-químicas en la superficie de las partículas y con propiedades físicas substancialmente diferentes de las del agua de absorción de los poros capilares, es esta agua de absorción de los poros del gel y su evaporación, la responsable del fenómeno de la contracción por secado.

El efecto no es irreversible, pues el reponer el agua de absorción trae como resultado una expansión (Swelling), y la recuperación parcial de la contracción.

Cuando el concreto está en estado fresco y la velocidad de exudación o sangrado (Bleeding) es menor que la velocidad de evaporación del agua superficial, se produce una contracción por secado muy rápida que es causante de fisuración, al no tener aún el concreto características resistentes significativas y no poder soportar las tensiones superficiales que acarrea la contracción.

Todos los concretos exudan en mayor o menor grado, y cuando este flujo de agua de la mezcla hacia la superficie va reponiendo de manera simultánea el agua superficial que se pierde por secado, tiene un efecto beneficioso si a continuación se aplica alguna técnica de curado para controlar la evaporación.

A este efecto particular de la contracción por secado se le denomina contracción o retracción plástica del concreto (Plastic Shrinkage) por ocurrir cuando la mezcla aún se encuentra fresca y en estado plástico.

El orden de magnitud de la deformación unitaria producida por la contracción por secado sin ningún control puede oscilar entre 400 y 1100 x 10⁻⁶ dependiendo del caso en particular.

En función de esto, las tensiones que se producen, pueden variar entre 100 kg/cm² y 275 kg/cm² en la generalidad de los casos, por lo que si recordamos que el orden de magnitud del esfuerzo en tracción del concreto es de alrededor del 10 % de la resistencia en compresión se puede deducir que para los concretos normales (100 kg/cm² a 350 kg/cm² de resistencia en compresión y del orden de 10 kg/cm² a 35 kg/cm² en tracción) los esfuerzos por contracción por secado normalmente superan a la capacidad resistente en tracción.

En consecuencia, debido a los altos valores de esfuerzos de tracción que ocasiona, la contracción por secado es generalmente la causa principal de fisuración del concreto.

Esto lleva a concluir que si no se comprende perfectamente el fenómeno y no se toman las medidas adecuadas para controlarlo, se producirá

indefectiblemente el agrietamiento; y en muchos casos en que éste es inevitable debido a las tensiones que ocurrirán, las condiciones del diseño arquitectónico y las características de exposición ambiental de las estructuras, habrá que determinar la ubicación conveniente de las juntas para orientar y regular la fisuración.

Sin ninguna medida de control, el fenómeno se desarrolla con la rapidez con que pierde agua el concreto, generando fisuras por contracción plástica que sólo tienen una profundidad del orden de 1 a 5 cm., por lo que en la mayoría de los casos no afectan el comportamiento estructural.

En las **Figuras 1, 2 y 3** se esquematiza un ejemplo simplificado que demuestra en forma práctica que las fisuras por contracción plástica no pueden desarrollar en general profundidades superiores a las indicadas.

Se evalúa una porción de losa de concreto de 1m x 1m x 0.15m de espesor donde la parte superior es la expuesta a la evaporación. Si asumimos un diseño de mezcla convencional, tendremos un contenido de agua del orden

de 180 kg/m³. Por otro lado en condiciones ambientales sumamente extremas de 30 °C de temperatura ambiente, 50% de humedad relativa, 38 °C de temperatura de colocación del concreto y 24 km/h de velocidad del viento, la tasa de evaporación es del orden de 2.5 kg/m²/h.

Tabla 1. Parámetros del ensayo.

Agua de mezcla	180 L/m ³
Temperatura Ambiente	30 °C
Temperatura de colocación del concreto	38 °C
Humedad relativa	50%
Velocidad del viento	24 km/h
Tasa de evaporación	2.5 kg/m ² /h

En el estado inicial, la losa no ha sufrido aún evaporación y tiene 27 kg de agua. Asumiendo el caso más desfavorable en que la velocidad de exudación es mínima, luego no hay reposición de agua superficial evaporada, el concreto en estado fresco no ofrece resistencia a la evaporación y no se toma ninguna precaución de curado.

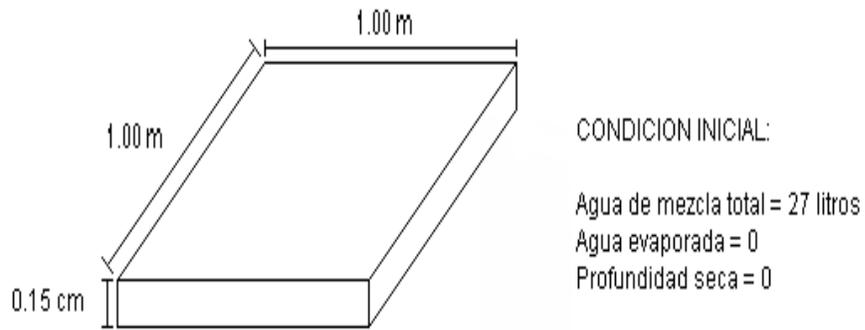


Figura 1. Losa en condición inicial.

Al cabo de una hora se han evaporado 2.5 litros de agua que representan un espesor de concreto seco de 1.4 cm.

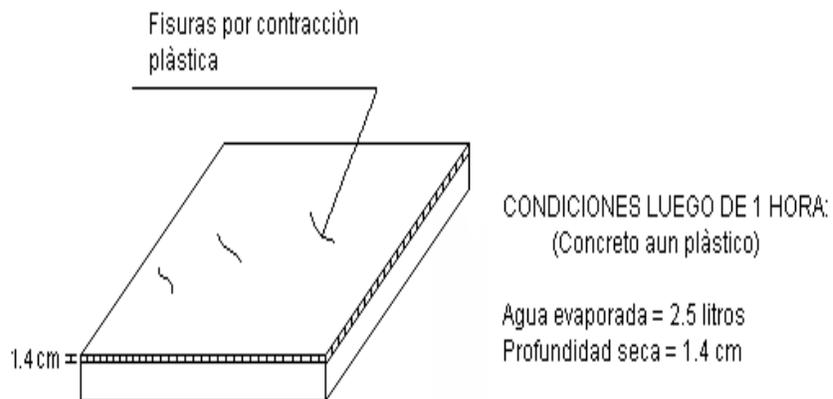


Figura 2. Losa luego de 1 hora.

Al cabo de 3 Horas, el concreto ya endureció y no se puede seguir desarrollando la contracción plástica sino sólo contracción por secado en estado endurecido, con una tasa de evaporación mucho más lenta por la dificultad en el flujo de agua de abajo hacia arriba en este estado.

Al cabo del tiempo indicado se habrán evaporado 7.5 litros de agua con un espesor seco de 4.2 cm.

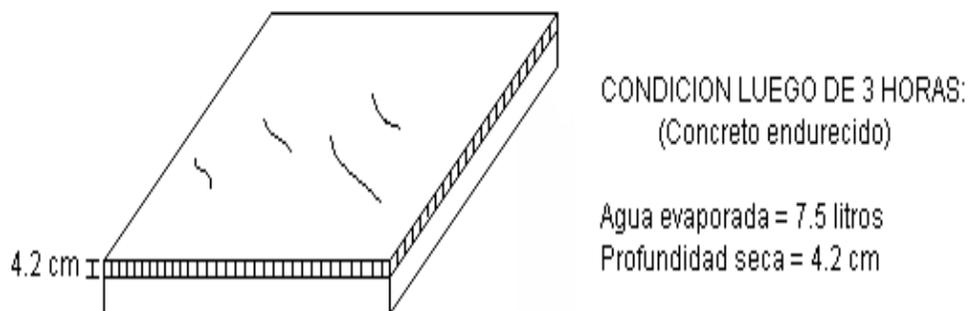


Figura 3. Losa luego de 3 horas.

Se evidencia pues que en una condición normal, sin las exigencias asumidas, el espesor seco donde se desarrollan las fisuras por contracción plástica será del orden de la mitad ó la tercera parte del calculado en base a las condiciones ambientales extremas consideradas en el ejemplo.

Esta aparición inicial de fisuras tiene un patrón aleatorio y con longitudes del orden de 5 a 20 cm., y se observan dentro de las primeras 24 horas posteriores al vaciado.

En la **Foto 1** se puede apreciar una losa de concreto sometida a condiciones ambientales extremas sin tomar ninguna precaución para evitar la evaporación, pudiéndose observar las fisuras típicas de contracción plástica por secado.



Foto 1. Losa de concreto con fisuras por contracción plástica.

Con el transcurrir del tiempo y al continuar la pérdida de agua, se originan fisuras por contracción por secado en el concreto endurecido que normalmente están separadas con un patrón de ocurrencia del orden de 30 veces el espesor del elemento, así como longitudes y profundidades de agrietamiento superiores, a las evaluadas para la contracción plástica, apareciendo en la mayoría de los casos no antes de 1 año después del vaciado, pudiendo estar comprometido el comportamiento estructural.

1.3.1.1.2.1 Factores que afectan la contracción por secado en el concreto

a) Características del cemento

El tipo de cemento, su finura y el contenido de yeso en la composición, influyen en marcar las diferencias en contracción por secado entre los diferentes cementos.

Existen estudios, que indican que no es posible a priori aseverar que un cemento que cumple con los requerimientos Standard para un tipo de cemento Pórtland tendrá mayor o menor contracción que otro cemento que cumple con requisitos diferentes.

Sin embargo, otros investigadores, han establecido tendencias que indican que en general los cementos Tipo II producen menor contracción que los Tipo I y mucho menor aún que los Tipo III.

De los aspectos mencionados, al parecer la finura del cemento es la que tiene menor influencia en la variabilidad de la retracción.

b) Tipo de agregado

Las características de los agregados son importantes en cuanto a sus consecuencias en la retracción del concreto, si se considera que la piedra y la arena con la pasta de cemento constituyen una estructura mixta.

Los agregados en el concreto restringen la retracción inherente de la pasta de cemento, por lo que la capacidad de deformación de los mismos y su adherencia con la pasta de cemento son las propiedades físicas que tienen importancia fundamental en la contracción del concreto. Dependiendo de las características de los agregados y su cantidad en el concreto, la contracción será sólo una fracción de la pasta sola, estimándose un orden

de magnitud de la cuarta o sexta parte de la atribuida a ésta.

Cuanto mayor es la rigidez del agregado y su módulo de elasticidad, mayor será la reducción de la retracción en el concreto. Al estar el módulo de elasticidad inversamente relacionado con la porosidad y la absorción del agregado, se puede concluir en que los agregados más densos y con baja absorción producen concretos con menor retracción, siendo el efecto inverso con agregados livianos y muy absorbentes.

Por otro lado, la cantidad de agregado en el volumen total del concreto, así como su granulometría tienen influencia primordial en la contracción, puesto que agregados con gradación discontinua ameritan una gran cantidad de cemento para lograr una estructura mixta resistente, y consecuentemente tiene mayor preponderancia la retracción al incrementarse la cantidad de pasta. Indirectamente, el tamaño máximo de las partículas de los agregados, afecta también la contracción ya que al depender de este la cantidad de agua de mezcla (que como veremos en el siguiente punto es otro de los factores condicionantes de la contracción), a mayor tamaño máximo o módulo de fineza total de los agregados, menor

será la contracción y viceversa.

En la **Figura 4** se puede apreciar la tendencia manifestada:

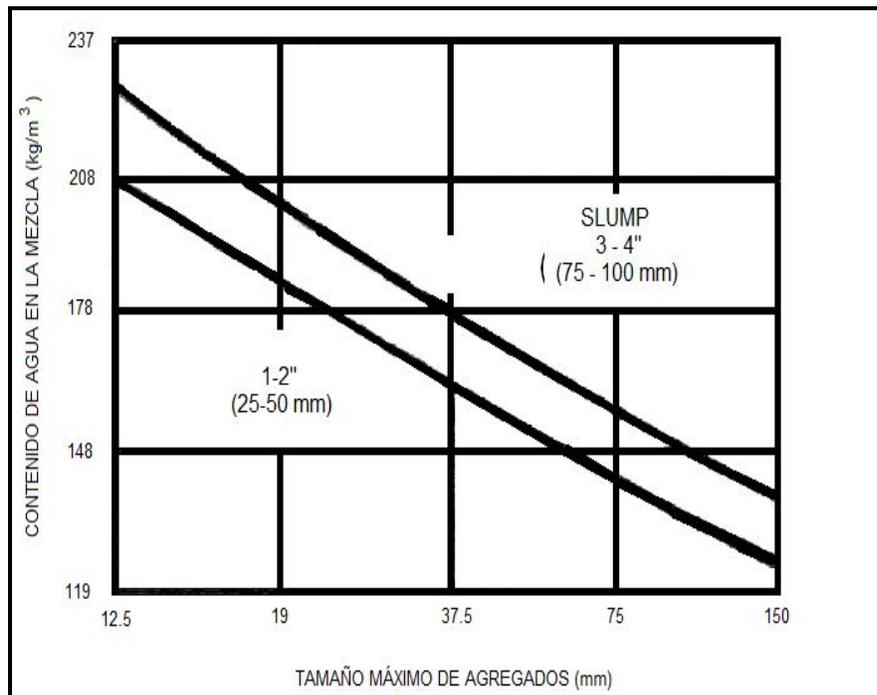


Figura 4

c) Trascendencia del contenido de agua en la mezcla como condicionante de la contracción

En la **Figura 5** podemos observar el efecto típico del contenido de agua en el concreto sobre la contracción, en base a un estudio desarrollado por el U.S. Bureau of Reclamation, donde se comprueba que la relación es directa y a mayor contenido de agua, aumenta la contracción.

Si se recuerda que la cantidad de agua en la mezcla está en función inversa del tamaño máximo del agregado, y en relación directa con el asentamiento (Slump) se puede concluir que empleando el mayor tamaño de agregado y el menor asentamiento compatibles con los requisitos de trabajabilidad, se logra reducir la contracción por secado.

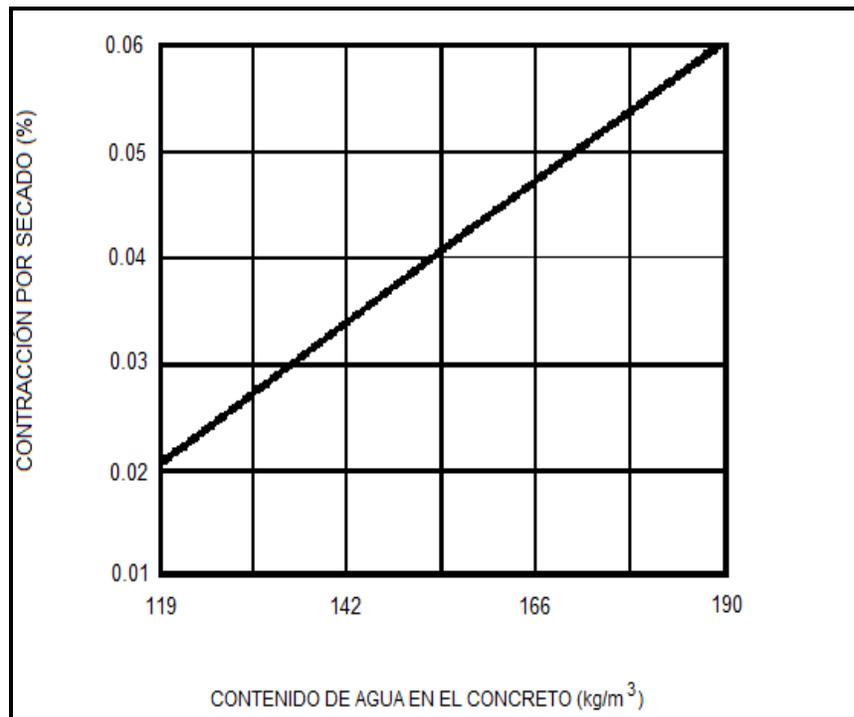


Figura 5

Otro factor que influye en los requerimientos de agua en la mezcla es la temperatura del concreto fresco, pues como se observa en la **Figura 6**, a mayor temperatura de la mezcla es mayor la cantidad de agua para un asentamiento constante. En este sentido, la temperatura individual de los componentes así como el calor de hidratación del cemento, definen la temperatura de la mezcla y por lo tanto, de su control dependerá indirectamente el reducir la contracción.

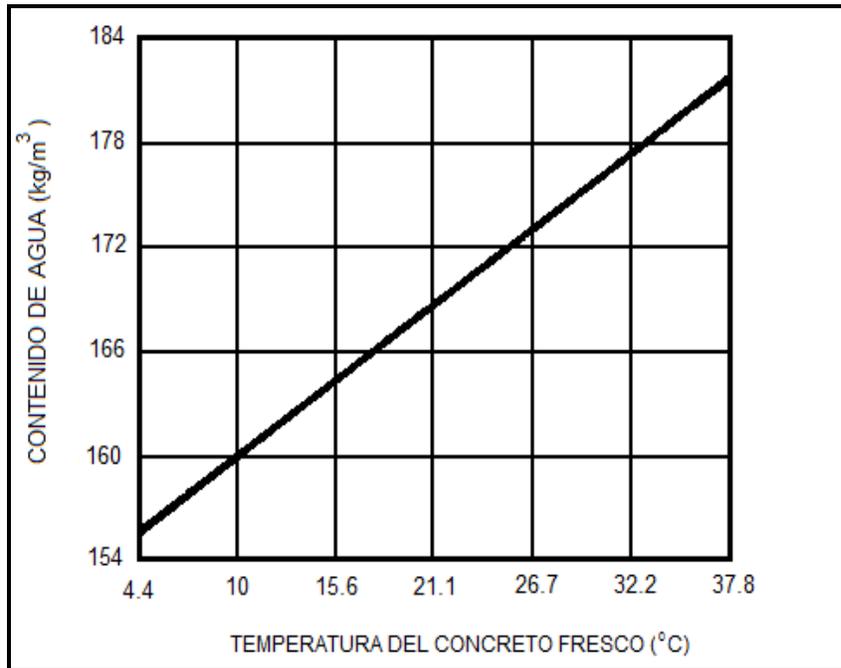


Figura 6

El aspecto final relacionado con la cantidad de agua y la retracción lo constituye la relación Agua/Cemento, donde el factor preponderante es la concentración de la pasta. Un concreto con relación A/C alta indica una concentración pobre de la pasta de cemento y un intercambio elevado de agua de absorción en los poros del gel durante el secado, con el incremento de la contracción.

En el caso inverso, los concretos con relaciones A/C bajas, tienen menor contracción por secado.

En la **Figura 7**, se pueden apreciar los resultados de una investigación que demuestra este efecto, que es independiente de la cantidad de cemento.

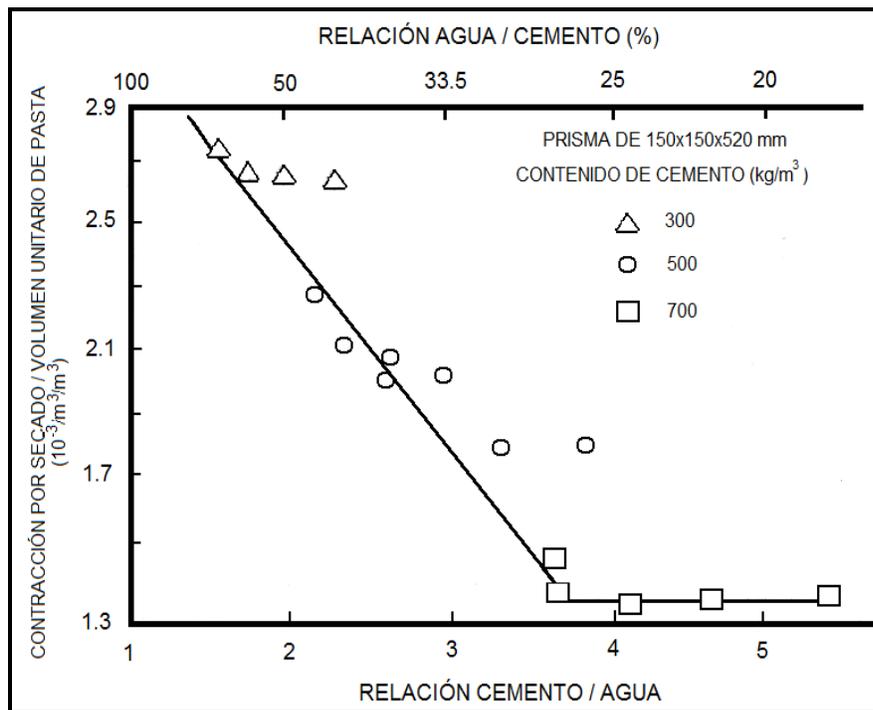


Figura 7

d) Influencia de los aditivos en la contracción por secado

En general, los aditivos que contribuyen a reducir el agua de amasado, tienden a colaborar en reducir la contracción, pero este efecto no es muy evidente en la mayoría de los casos. Sin embargo, está demostrado que en el caso de los superplastificantes, esta reducción sí es significativa, en un orden de magnitud de 30 %.

Los incorporadores de aire, pese a introducir una estructura de vacíos adicional en la mezcla, no incrementan de manera significativa la retracción, con inclusiones de aire hasta del 5%.

Los acelerantes ocasionan un incremento en la contracción por secado que en promedio puede llegar a ser hasta del 50% de la normal, desarrollándose la mayor parte a edades tempranas (7 días) y disminuyendo con el tiempo.

Los acelerantes incrementan la temperatura del concreto fresco por la reacción exotérmica con el cemento y consecuentemente los

requerimientos de agua en la mezcla y la contracción, por lo que éste es otro de los efectos a tener presentes en el control de la temperatura de la mezcla.

Las puzolanas empleadas como aditivos en las mezclas, no son de uso normal en nuestro medio, no obstante, estas ya vienen introducidas en varios de los cementos disponibles en el mercado nacional como cementos Pórtland Tipo IP e IPM, por lo que es interesante abordar su efecto.

Las puzolanas contribuyen en general a aumentar los requerimientos de agua de la mezcla, pues le confieren una consistencia cohesiva por la que es necesario añadir más agua de la usual para obtener la trabajabilidad deseada. Luego pues, tienden a incrementar la contracción, pero este efecto se refleja primordialmente en estructuras de pequeñas dimensiones, más no en las estructuras masivas. Esto es debido en primer término al efecto de las dimensiones de los elementos, y la retentividad de agua que manifiestan las puzolanas; y en segundo lugar porque en los vaciados de elementos de dimensiones reducidas es necesario trabajar con mayores asentamientos para poderlas colmar eficientemente, y esto obliga a añadir

más agua, lo que no se da en vaciados masivos en que las dimensiones de los elementos permiten trabajar con concretos muy secos.

e) Influencia de la duración del curado húmedo

El concepto básico reside en que la duración del curado húmedo del concreto no reduce la contracción por secado pues sólo la detiene mientras dura, pero una vez que se inicia el secado, se verifica igual. La explicación está en que el curado entre 7 y 28 días propicia el desarrollo de las características resistentes del concreto y su capacidad de soportar esfuerzos generados por la contracción, pero no altera la continuidad del fenómeno pues en la medida que se produzca la pérdida del agua habrá retracción inexorablemente.

Existe sin embargo evidencia experimental que cuando el curado húmedo se efectúa con vapor y a presión atmosférica cual es el caso de los prefabricados, la contracción se reduce, probablemente por modificar la estructura de los poros del gel.

f) Efecto de las dimensiones del elemento estructural

La velocidad con que una estructura pierde agua, depende de las dimensiones de la misma pues cuantos mayores sean estas, mayor será el recorrido del flujo de agua hacia la superficie expuesta. En la **Figura 8**, se puede apreciar que el fenómeno de la contracción disminuye en la medida que aumentan las dimensiones del elemento para el mismo tipo de concreto.

Un aspecto importante del efecto dimensional en la retracción es que las pruebas de laboratorio para medida dan valores más altos que los obtenidos en las estructuras in situ, por lo que deben tomarse estos resultados con mucho cuidado cuando se trate de extrapolarlos cuantitativamente a escala natural.

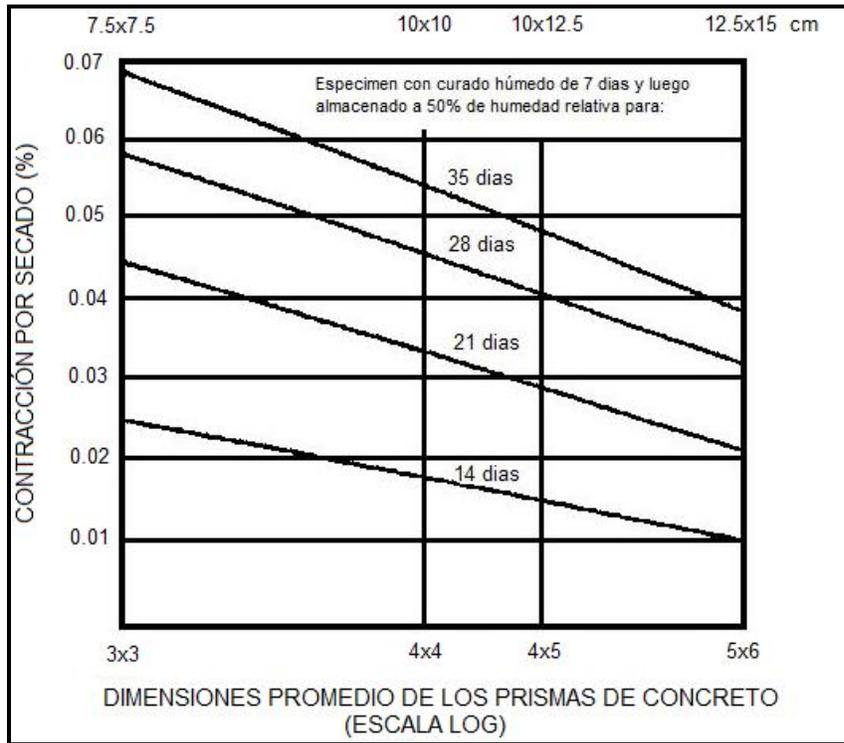


Figura 8

1.3.1.1.3 Contracción por carbonatación

Es un fenómeno que se produce exclusivamente en el concreto endurecido, y es causado por la reacción de los cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de los productos de hidratación del cemento comprimidos por la contracción de secado, con el CO_2 del ambiente formándose CaCO_3 con una reducción del volumen inicial que causa una descompresión interna y contracción adicional.

La humedad durante la exposición al Bióxido de Carbono es el factor principal que influye en la contracción por carbonatación, verificándose experimentalmente que los mayores valores se producen para humedades relativas del orden del 50%, mientras que es despreciables para humedades relativas cercanas al 100% o por debajo del 25%.

Esta reacción se produce aún para bajas concentraciones de CO₂, siendo más trascendente su efecto a nivel de laboratorio en que el tamaño de los especímenes favorece la contracción, o en el caso de estructuras que están sometidas a condiciones de exposición muy saturadas de CO₂ como suele ocurrir en ciertas instalaciones industriales.

El control de las condiciones de humedad resulta el sistema más eficaz para atenuarla, y los valores de deformación unitaria oscilan entre 10 a 100 x 10⁻⁶, por lo que las tensiones que produce normalmente son del orden de 2 a 20 kg/cm² no ocasionando fisuración en la mayoría de los casos.

1.3.1.2 Cambios térmicos

Las variaciones de temperatura en el concreto producen cambios volumétricos que inducen esfuerzos adicionales. Cuando estos esfuerzos superan la resistencia en tracción del concreto se produce la fisuración. Estos cambios térmicos pueden deberse al calor de hidratación del cemento y/o las condiciones ambientales.

El coeficiente de expansión térmica del concreto es del orden de 7 a 11×10^{-6} $^{\circ}\text{C}$ con un promedio de 10×10^{-6} $^{\circ}\text{C}$ y es el que condiciona la capacidad de deformación por temperatura. Si aplicamos los principios de la termodinámica, se puede inferir que cada $^{\circ}\text{C}$ de gradiente térmico induce un esfuerzo en el concreto del orden de 2 kg/cm^2 . Por lo tanto, para concretos normales del orden de 200 kg/cm^2 de resistencia en compresión, un gradiente térmico de alrededor de $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ puede ocasionar agrietamiento si las condiciones de borde restringen las deformaciones, ocasionando esfuerzos que superan la capacidad resistente en tracción del concreto.

Los cambios térmicos producidos por el calor de hidratación del cemento se verifican con mayor intensidad en el denominado concreto masivo, que

en términos generales incluye a las estructuras con relación Volumen/Área superficial expuesta muy grande.

Como se observa en las **Figuras 9 y 10** el tipo de cemento tiene una influencia primordial en el incremento de temperatura por el calor de hidratación. Por otro lado, la temperatura de colocación así como la temperatura ambiente tienen mucha trascendencia en el ascenso de la temperatura y el tiempo en que llega a su valor máximo (**Figuras 11 y 12**).

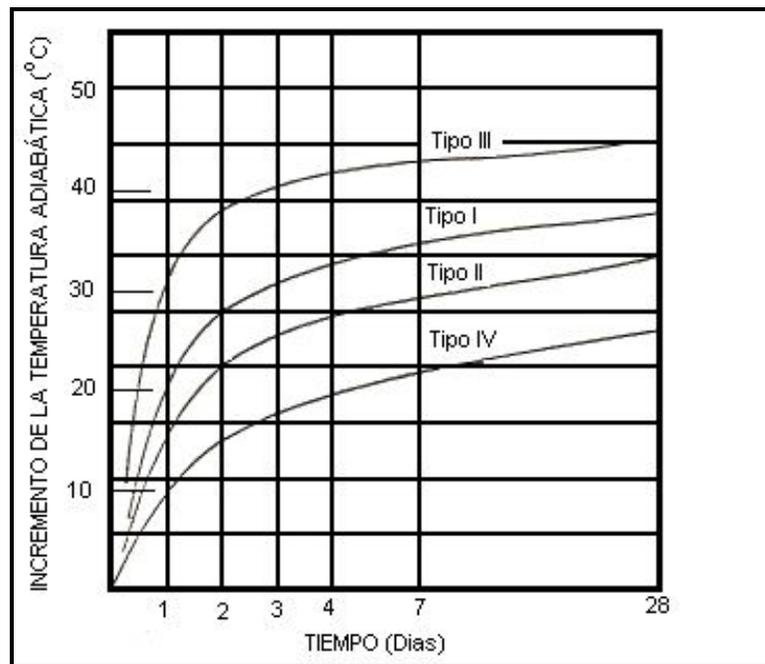


Figura 9

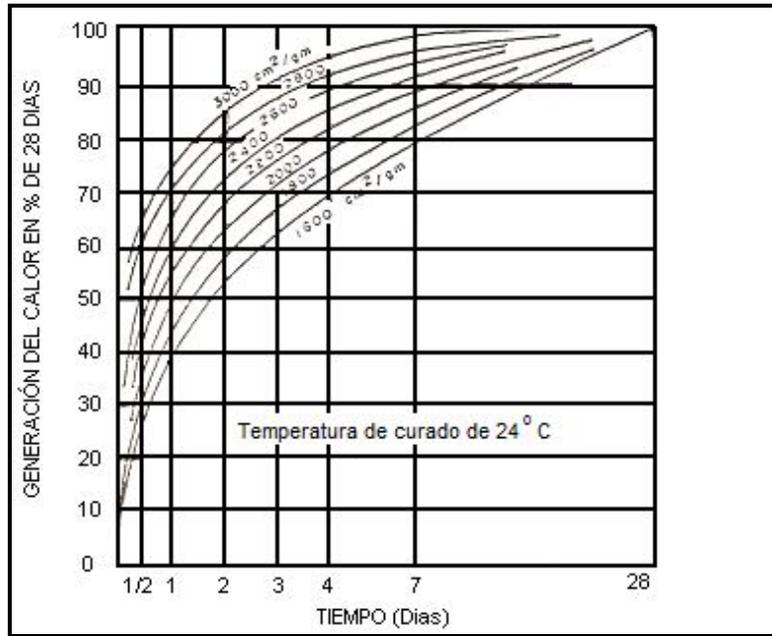


Figura 10

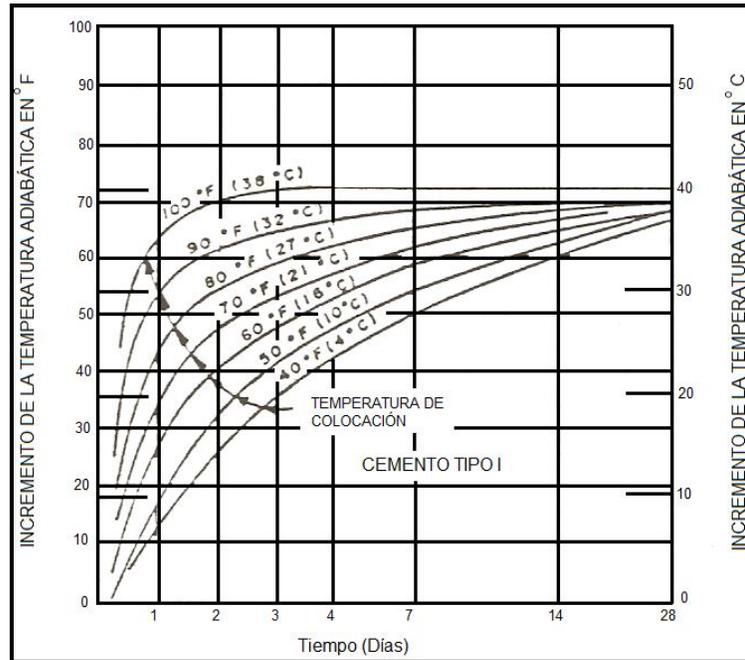


Figura 11

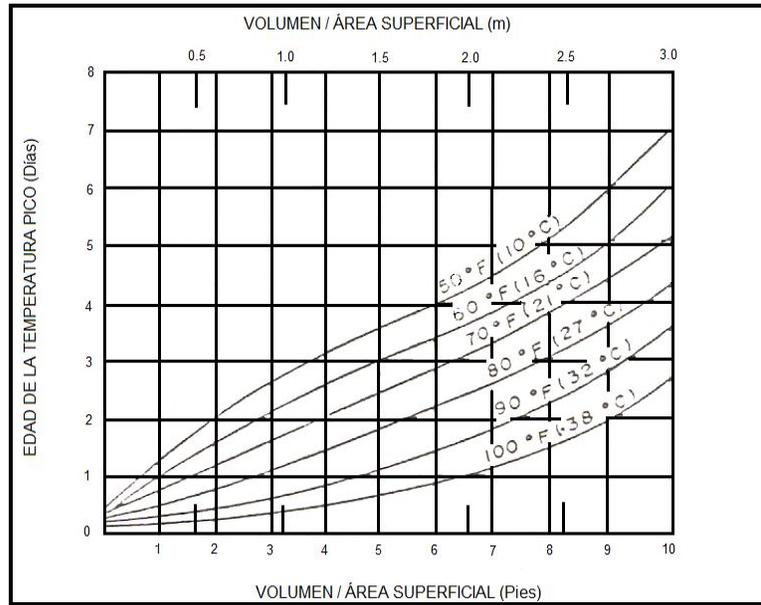


Figura 12

En la **Figura 13** se observan las curvas que permiten evaluar en función de la temperatura de colocación del concreto y la relación Volumen/Área Superficial expuesta, el incremento de temperatura a esperarse si se emplea cemento Tipo I.

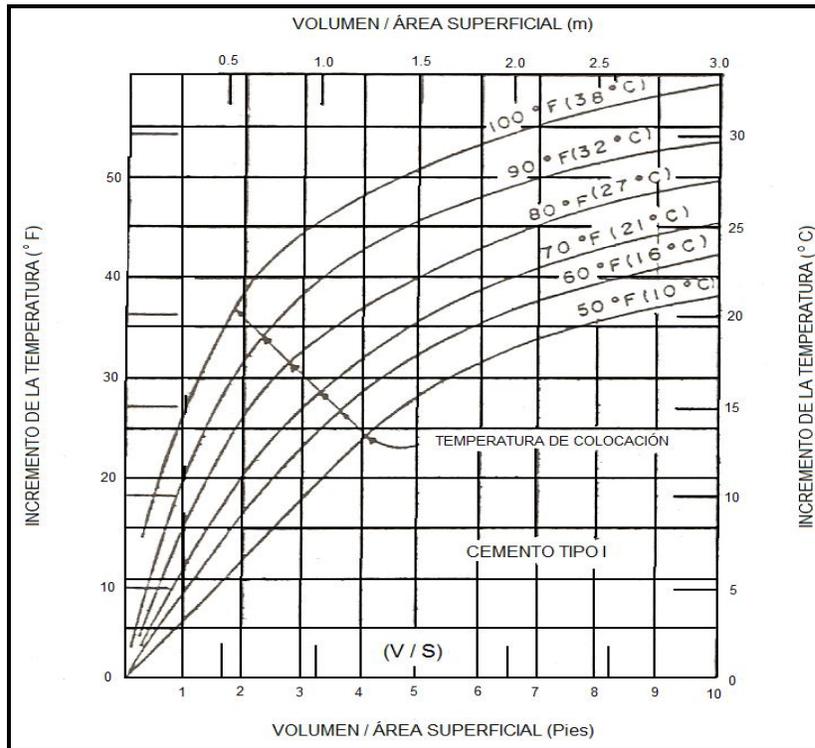


Figura 13

En la **Figura 14** podemos comprobar el efecto de la relación Volumen/Área superficial, con el tiempo que necesita el concreto para disipar o absorber según sea el caso, el gradiente de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de colocación, concluyéndose en la importancia de tomar las precauciones necesarias para afrontar el intercambio de calor para estructuras masivas.

En el caso de estructuras de relación Volumen/Área superficial pequeña, los cambios térmicos se reflejan por el gradiente de temperatura entre caras opuestas, lo que por lo general induce flexiones y esfuerzos de tracción superficiales. Cuanto mayor sea el gradiente térmico mayor serán los esfuerzos inducidos y la posibilidad de fisuración.

Uno de los aspectos más importantes de los cambios térmicos está constituido por los ciclos de hielo y deshielo, en que el incremento del volumen del agua interna en el concreto produce expansiones y la posibilidad de fisuración si no se emplean incorporadores de aire para crear una estructura de vacíos adicional que contrarreste dichas expansiones.

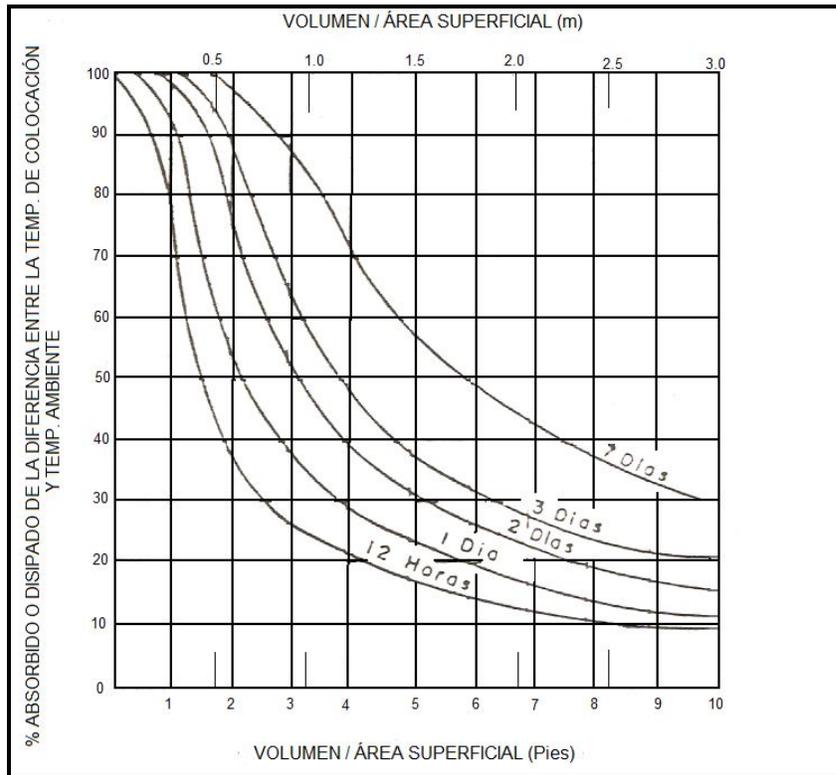


Figura 14

CAPÍTULO II

DE LOS MATERIALES

2.1 Cemento Pórtland

El cemento Pórtland es un aglomerante artificial consistente en polvo de color gris que se obtiene de la molienda del Clinker y el posterior batido con yeso y otras adiciones y aditivos (puzolanas, escorias de alto horno, cenizas volantes). Tiene la peculiaridad de fraguar al contacto con el agua y producir compuestos cohesionados y mecánicamente resistentes. Recibe el nombre de Pórtland debido a la similitud con rocas de la isla inglesa del mismo nombre.

Químicamente el cemento Pórtland es una mezcla de muchos compuestos, cuatro de ellos forman el 90% o más del peso y son el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico. Además de ellos existen otros componentes que desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación.

Según los contenidos proporcionales de los cuatro compuestos principales y aditivos, se definen tipos de cemento Pórtland, cada uno con cualidades y usos específicos diferentes. Los tipos más comunes son el Pórtland Tipo I, Pórtland Tipo I modificado (ó especial) y el Tipo III. A continuación una breve descripción de cada tipo:

Cemento Pórtland Tipo I.- También conocido como cemento gris. Es el tipo destinado a obras que no exijan propiedades especiales. Su composición puede variar considerablemente según la marca. Puede contener puzolanas artificiales o naturales como cenizas, ladrillo molido y tierras volcánicas para mejorar sus propiedades.

Cemento Pórtland Tipo II.- Se emplea en donde puede presentarse ataque moderado por sulfatos (estructuras de drenaje o concreto expuestos al aguas contaminadas de mar), asimismo cuando se desea un moderado calor de hidratación. Se recomienda para las construcciones en zonas costeras.

Cemento Pórtland Tipo III.- Se usa cuando se requiere de una alta resistencia inicial y rápido endurecimiento. Su composición es similar a la del Tipo I, pero con mayor finura y sin el uso de puzolanas. Algunas veces presenta una baja resistencia a los sulfatos.

Cemento Pórtland Tipo IV.- Es un cemento de bajo calor de hidratación, ideal para el vaciado de grandes columnas de concreto, como presas por ejemplo.

Cemento Pórtland Tipo V.- Este es un cemento de altísima resistencia a los sulfatos ideal para estructuras en contacto con el agua de mar, para lo cual se especifica un contenido de aluminatos de calcio de 5% como máximo.

Cemento Pórtland Tipo I Especial o Modificado.- Es un cemento de características físicas intermedias entre el cemento Tipo I y el cemento Tipo III. Es de resistencia inicial alta y de endurecimiento rápido. Tiene adición de puzolanas en una mayor proporción que el cemento Tipo I.

Cemento blanco.- Es un cemento Pórtland del Tipo I que resulta de seleccionar materias primas muy puras y de un adecuado proceso de producción que permite lograr un color blanco, factor que le da el valor agregado al producto para usos específicos, de excelente apariencia y acabado.

El Clinker Pórtland blanco está constituido principalmente por silicatos aluminatos y ferroaluminatos de calcio. La molienda de este tipo de Clinker conjuntamente con sulfato de calcio origina el cemento blanco.

Cemento para mampostería.- Cemento Pórtland Tipo I con aditivos incorporadores de aire (cal hidratada, yeso hidratado, plastificantes, retenedores de humedad), especial para morteros de revoque o de pega, en una proporción de una parte de cemento por tres a cuatro de arena. La composición del cemento varía según el fabricante y el uso específico que se le quiera dar. Este tipo de cemento ofrece las ventajas de facilidad de mezclado, suavidad de aplicación, mayor adherencia de la mezcla, alta capacidad de retención de agua (se mezcla una vez y no se endurece en el recipiente), mejor trabajabilidad, más productividad.

También existe un tipo de cemento que es prácticamente libre de aluminato tricálcico, por lo cual puede ser utilizado para la construcción de plantas químicas que usen ácido sulfúrico o sus derivados. El uso de este tipo de cemento requiere cuidados especiales en cuanto a la protección de la mezcla durante el fraguado, ya que las bajas temperaturas pueden afectar sus propiedades. Se usa en ambientes con altos niveles de sulfatos. En su fabricación se aumenta el contenido de hierro.

Otros cementos especiales que se emplean y utilizan para aplicaciones específicas son los cementos para mampostería, los cementos de escorias ferruginosas, cemento aluminoso, cemento sulfoaluminoso y cemento puzolánico.

2.2 Agregados

2.2.1 Generalidades

Los agregados utilizados para la investigación son de procedencia de la cantera de Jicamarca donados por la empresa Unión de Concreteras S.A (UNICON). Estos agregados son obtenidos mediante un proceso de chancado, zarandeo, tamizado y lavado obteniendo un producto libre de contaminación y cumpliendo las especificaciones de las Normas ASTM y NTP.

2.2.2 Definición

Los agregados ocupan del 60% al 80% del volumen del concreto. Por tanto, sus características influyen en las propiedades del mismo. Los agregados influyen en las proporciones de la mezcla para el concreto y en la economía. Deben satisfacer ciertos requisitos y deben consistir en partículas limpias, duras, resistentes y durables, libres de sustancias químicas, recubrimientos de arcilla, o de otros materiales finos que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

Las partículas débiles, quebradizas y laminadas son perjudiciales. Deberán evitarse especialmente los agregados que contengan pizarras laminares naturales o esquistos, partículas blandas y porosas, y algunos tipos de

cuarzo ya que tienen mala resistencia al intemperismo. A menudo, basta una inspección visual para descubrir la debilidad en los agregados, de los cuales no se tengan registros sobre su buen comportamiento, y deberán probarse para ver si cumplen con los requisitos de control de calidad.

Tabla 2. Requisitos granulométricos y límites para las sustancias perjudiciales en agregado fino y grueso según la ASTM C 33.

Requisitos		Límites para sustancias perjudiciales		
Tamiz Estándar	Límites totales % acumulado Pasante	Descripción	Agregado Fino %	Agregado Grueso %
3/8"	100	1). Lentes de arcilla y partículas deleznable	3	2.0 a 10.0 (c)
# 4	95 a 100	2). Material menor que la malla # 200	3.0 a 5.0 (a)	1.0 (g)
# 8	80 a 100	3). Carbón y Lignito	0.5 a 1.0 (b)	0.5 a 1.0 (d)
# 16	50 a 85	4). Partículas ligeras (G<2.4)	-----	3.0 a 8.0 (e)
# 30	25 a 60	5). Suma de 1), 3) y 4)	-----	3.0 a 10.0 (f)
# 50	10 a 30	6). Abrasión	-----	50
# 100	2 a 10	7). Desgaste con sulfato de sodio	10	12
		8). Desgaste con sulfato de Magnesio	15	18

- a) 3% para concretos sujetos a abrasión y 5% para los demás. Si se trata proveniente de chancado y el material más fino que el tamiz 75 µm (Nº 200) consta de polvo de la fractura, esencialmente sin arcilla o pizarra, estos límites pueden aumentarse a 5 y 7 %, respectivamente.
- b) 0.5% cuando la apariencia del concreto es importante y 1% para el resto.
- c) 2% y 3% para concreto arquitectónico en clima severo y moderado, 3% para losas y pavimentos expuestos a humedecimiento, 5% en estructuras interiores y 10% en zapatas y columnas interiores.
- d) 0.5 % en concreto al exterior, 1% en el resto.
- e) 3% en concreto arquitectónico, 5% en concreto a la intemperie, 8 % en el resto.
- f) 3% y 5% para concreto estructural en clima severo y moderado, 7% en concreto a la intemperie, 10% el resto.
- g) Este porcentaje bajo cualquiera de las condiciones siguientes: (1) se permite incrementar a 1.5 si el material es esencialmente libre arcillas o limonitas; o (2) Si la fuente de agregado fino a ser usado en el concreto es conocida por tener menos de la cantidad máxima especificada de pasante de la malla de 75 µm (No 200) (tabla 1), se permite incrementar el porcentaje límite (L) en la cantidad de agregado grueso a $L = 1 + [(P)/(100-P)] (T-A)$, donde P = porcentaje de la arena en el concreto como porcentaje del total del agregado, T = el límite de la tabla para la cantidad permitida en el agregado fino, y A = la cantidad actual en el agregado fino. (Esto provee un cálculo de pesos diseñado para limitar la mas máxima de material pasante de la malla de 75 µm (No.200) en el concreto de lo que se obtendría si ambos agregado fino y grueso fueren suministrados al máximo porcentaje tabulado para cada uno de estos ingredientes.

2.2.2 Características de los agregados

Absorción y humedad superficial: La absorción y la humedad superficial de los agregados deben determinarse, de manera que la proporción de agua en el concreto pueda controlarse y se puedan determinar los pesos correctos de las mezclas. La estructura interna de un agregado está formada por materia sólida y huecos que pueden contener agua o no.

Las condiciones de humedad de los agregados se muestran en la **Figura 15**. Se designa de la siguiente manera:

- Secados al horno, donde se observa totalmente seco.
- Secados al aire, donde se observa la partícula con la superficie secas, conteniendo algo de humedad internamente.
- Saturados y superficialmente secos, donde las partículas no absorben agua ni aumentan el agua de la mezcla.
- Húmedos o mojados, conteniendo un exceso de humedad en la superficie.

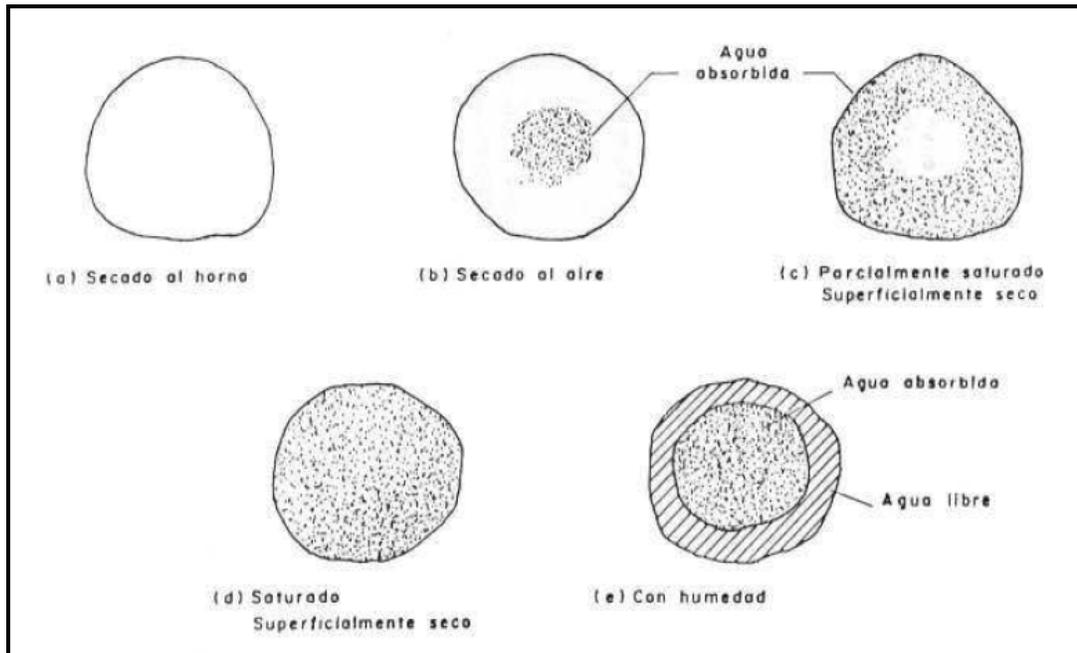


Figura 15. Condiciones de humedad de los agregados.

Granulometría: La granulometría o distribución del agregado según su tamaño se determina con un análisis granulométrico. Los tamices estándares para determinar la gradación de los agregados finos son los N° 4, 8, 16, 30, 50, 100 y están basadas de acuerdo con sus perforaciones cuadradas.

Los tamices estándares para determinar la gradación de los agregados gruesos tienen perforaciones cuadradas de 6", 3", 1 ½", ¾", y 3/8" de pulgada, más un N°4 (que tiene cuatro alambres por pulgada).

Otros tamaños de tamices que se usan con frecuencia para agregados gruesos son la de 2 ½", 2", 1", ½" pulgada.

A continuación presentamos los límites granulométricos según la norma ASTM C 33 (**Tablas 3 y 4**, y las **Figuras 16 y 18**).

Tabla 3. Requisitos para clasificar los agregados gruesos y finos según el ASTM C 33.

N° A.S.T.M	TAMAÑO NOMINAL	% Que pasa por los tamices normalizados													
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18m m	300 μm
		4"	3 1/2"	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº50
1	3 1/2" a 1 1/2"	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 5						
2	2 1/2" a 1 1/2"			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5						
3	2" a 1"				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
357	2" a Nº4				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5			
4	1 1/2" a 3/4"					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15		0 a 5				
467	1 1/2" a Nº4					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5			
5	1" a 1/2"						100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5				
56	1" a 3/8"						100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5			
57	1" a Nº4						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5		
6	3/4" a 3/8"							100	90 a 10	20 a 55	0 a 15	0 a 5			
67	3/4" a Nº4							100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5		
7	1/2" a Nº4								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5		
8	3/8" a Nº8									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
89	3/8" a Nº16									100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9 ^A	3/8" a Nº8										100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

^A El Agregado de Huso 9 es definido en La Norma C 125 como Agregado Fino. Se incluye como agregado grueso cuando se combina con un material del Huso 8 para crear un Huso 89, el cual es un agregado grueso según lo definido por la Norma C 125.

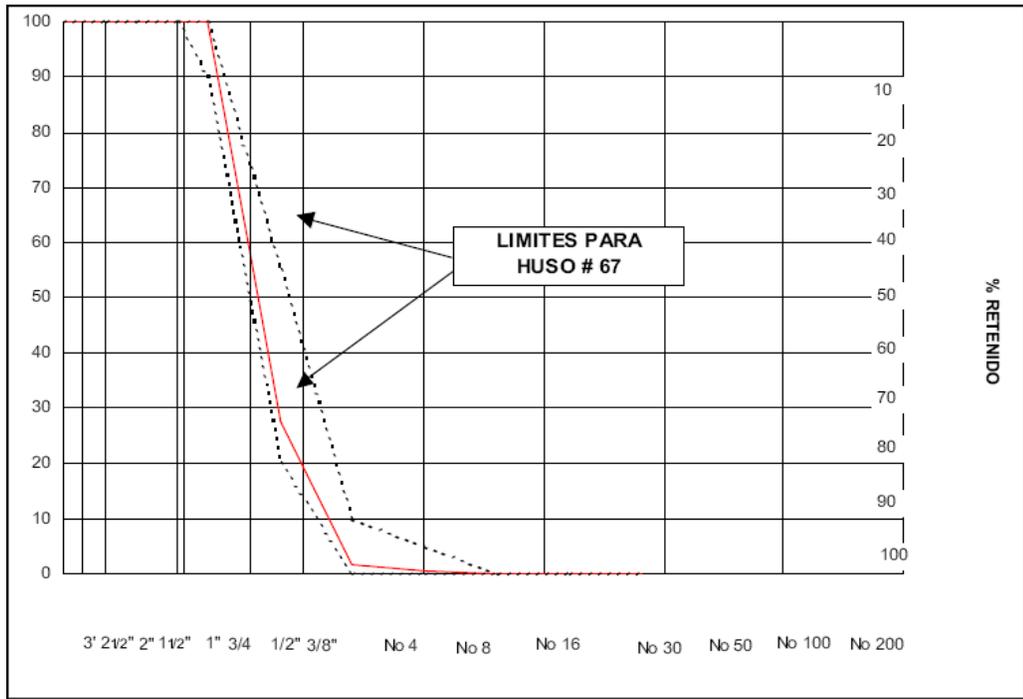


Figura 16. Límite granulométrico para agregado grueso de Huso #67.

Existen varias razones para especificar límites en las granulometrías y el tamaño máximo de los agregados. Siendo el tamaño máximo el menor tamaño de tamiz por la que pasa la totalidad del agregado (100%); y el tamaño máximo nominal es el que se utiliza en los diseño de mezclas y tiene 2 formas para ser entendido mejor; 1) TMN es el menor tamaño de tamiz que pasa la mayor parte del agregado (no menos del 85%). 2) TMN es el mayor tamaño de tamiz que tiene el primer retenido (15% o menos).

La granulometría y el tamaño máximo afectan las proporciones relativas de los agregados, así como el cemento y el agua necesaria, la trabajabilidad, la economía, la porosidad y la contracción del concreto. Las variaciones en la gradación pueden afectar seriamente la uniformidad del concreto de una mezcla a otra. Las arenas muy finas son con frecuencia costosas y las arenas muy gruesas pueden producir mezclas muy ásperas y poco manejables.

En general, los agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y dan una gran curva granulométrica pareja producen los mejores resultados, lo que se puede aplicar por la llamada teoría de la máxima densidad o del mínimo de huecos. El concepto del mínimo de huecos se puede observar en el **Figura 17**.

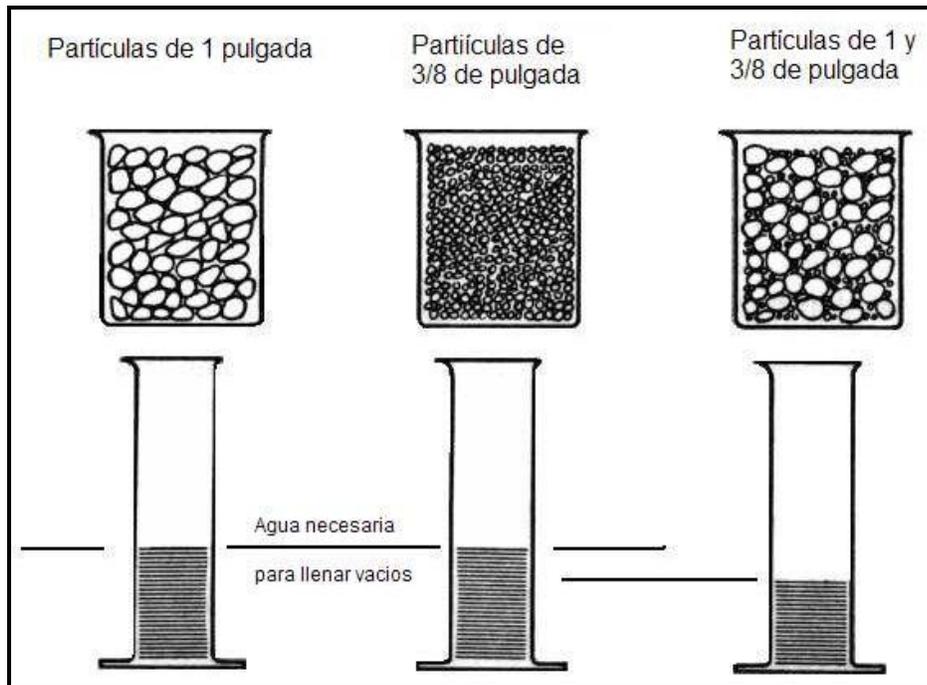


Figura 17. Ilustración de la teoría de la máxima densidad.

La granulometría más conveniente para el agregado fino depende del tipo de trabajo, riqueza de la mezcla, y tamaño máximo nominal del agregado grueso. En mezclas pobres o cuando se usan agregados gruesos de tamaño pequeño, es conveniente una granulometría que se aproxime lo más que se pueda al porcentaje máximo recomendado que pasa por cada tamiz, para así aumentar la trabajabilidad. En las mezclas ricas, por economía, son más convenientes las granulometrías gruesas.

Si se mantiene constante la relación a/c y se elige correctamente la relación agregado fino – grueso, puede usarse una amplia variación en la granulometría, sin que se produzca un efecto apreciable en la resistencia.

Las cantidades de agregado fino que pasan por los tamices números 50 y 100 afectan la trabajabilidad, la facilidad para lograr buenos acabados, textura superficial, y la exudación del concreto.

Tabla 4. Requisitos para clasificar los agregados finos según el ASTM C 33.

Tamiz Estándar para agregado fino	% Pasa
9.5 mm (3/8 ")	100
4.75 mm (N° 4)	95 a 100
2.36 mm (N° 8)	80 a 100
1.18 mm (N° 16)	50 a 85
600 - μ m (N° 30)	25 a 60
300 - μ m (N° 50)	5 a 30
150 - μ m (N° 100)	0 a 10

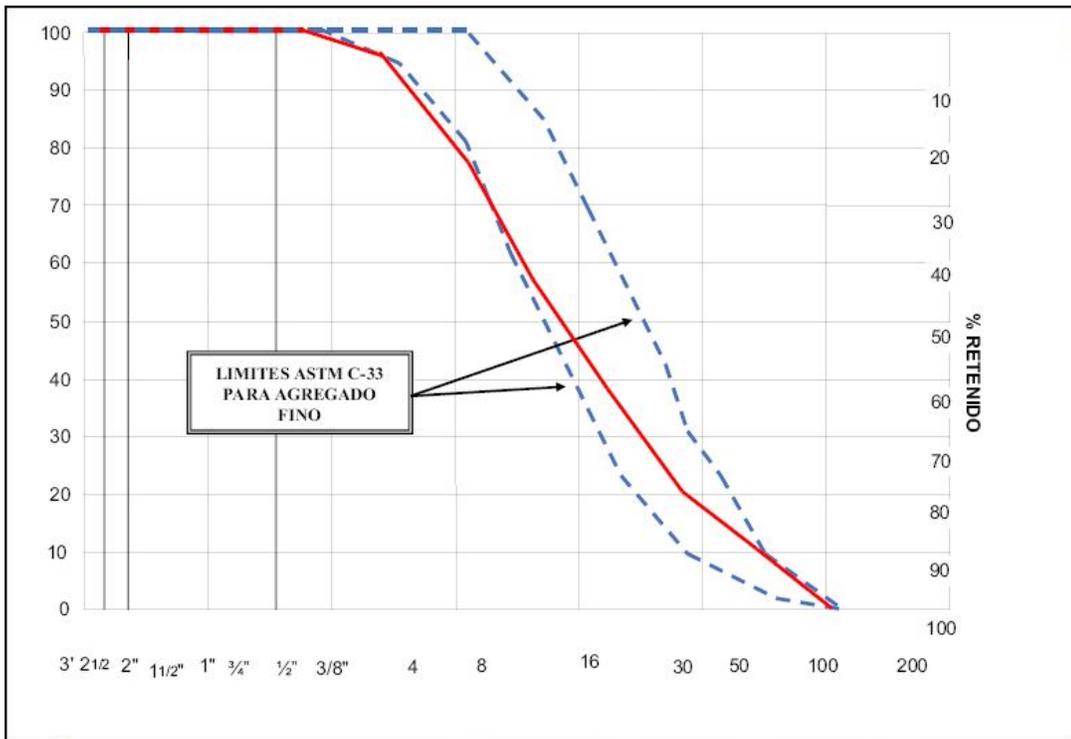


Figura 18. Límite granulométrico para agregado fino.

Otros requisitos de estas especificaciones son:

- Que el agregado fino no tenga más del 45% retenido entre 2 tamices estándar consecutivos.
- Que el módulo de finura o fineza no sea menor de 2.3 o mayor de 3.1, ni varíe más de 0.20 del valor supuesto al elegir las proporciones

del concreto. Si se excede de este valor, el agregado fino se rechaza, a menos que rehagan ajustes pertinentes en las proporciones de agregado fino y agregado grueso.

Se define como módulo de fineza o finura, ya sea agregado fino o del grueso, la suma de los porcentajes acumulados de agregados retenidos en los tamices estándar, dividida por 100. Es un indicador de la finura de un agregado: cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado. Es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas para concreto.

Tabla 5. Ejemplo de cálculo del modulo de finura.

Tamaño del tamiz	% Que pasa	% Retenido acumulado
# 4	98	2
# 8	85	15
# 16	65	35
# 30	45	55
# 50	21	79
# 100	3	97

Modulo de finura = $283/100 = 2.83$

Resistencia al desgaste: La resistencia al desgaste se usa con frecuencia como indicador general de la calidad del agregado. Esta característica es esencial cuando el agregado se va a usar en concreto sujeto a desgaste como en los pisos para servicio pesado.

Resistencia a la congelación y a la fusión: Una característica importante del concreto que va a quedar expuesto a la intemperie, la resistencia a la congelación y fusión de un agregado, está relacionada a su porosidad, absorción y estructura porosa. Si una partícula de agregado absorbe demasiada agua, el espacio en los poros no será suficiente para dar cabida a la dilatación del agua que ocurre durante la congelación.

Estabilidad química: Se considera que los agregados tienen estabilidad cuando no reaccionan químicamente con el cemento en forma peligrosa, ni sufren la influencia química de otras fuentes externas. En algunas regiones, los agregados que tienen ciertos elementos químicos reaccionan con los álcalis del cemento.

Esta reacción álcali agregado puede producir expansión anormal y agrietamientos irregulares en el concreto. Los registros del comportamiento en el campo generalmente proporcionan la mejor información para poder seleccionar agregados sin afinidad química. Si no existen registros sobre el comportamiento del agregado, las pruebas de laboratorio son útiles para determinar su calidad. Existen tres pruebas ASTM para identificar los agregados que reaccionan con los álcalis, dos para los del tipo silicoso y una para los tipos de tipo carbonatado. Además, existe una técnica de la ASTM que se recomienda, la ASTM C 295 para el examen petrográfico de los agregados de ambos tipos. De las tres pruebas, la ASTM C 227, comúnmente llamada la de la barra de mortero, se usa para determinar la afinidad química potencial expansiva entre el álcali y la sílice de combinación del cemento y agregado. En esta prueba se mide la expansión que se desarrolla en pequeñas barras de mortero durante su almacenamiento a una temperatura y humedad prescritas. La prueba de la barra de mortero puede usarse para los agregados finos y gruesos, pero generalmente deben transcurrir de tres a seis meses antes de poder hacer conclusiones.

La segunda prueba, la ASTM C 289, conocida con el nombre de prueba química rápida, se usa para identificar los agregados silicosos con afinidad química potencial. Puede terminarse en dos o tres días. Las conclusiones se basan en la intensidad de la reacción que ocurre entre una solución de hidróxido de sodio y una muestra triturada del agregado en cuestión.

La prueba de la especificación ASTM C 586, comúnmente conocida como prueba del cilindro de roca, se usa para detectar los agregados carbonatados potencialmente expansivos. Los cambios de longitud se determinan cuando la muestra está sumergida en una solución de hidróxido de sodio. Las tendencias expansivas son usualmente observables después de 28 días de inmersión.

Los minerales, rocas y materiales sintéticos que pueden ser potencialmente reactivos con los álcalis del cemento son: Andesitas, Pizarras, Opalinas, Dolomitas, Calcíticas, Argillitas, Filitas, Calizas Dolomíticas, Cuarzita, Dolomitas de grano fino, Calcedonia Cuarzosa, Cristobalita, Riolitas, Dacita, Esquistos, Vidrio Volcánico, Pizarras Silicias y ciertas Gneis Granítico Vidrio Silíceo, Sintético y Ópalo Tridimita.

Y las condiciones ideales para que exista este tipo de reacción son:

- Mineral reactivo.
- Alto contenido de álcalis >0.6%
- Humedad relativa y temperaturas elevadas (>80% y 35°C).
- Edad de la estructura no menor a 5 años.

Forma y textura superficial de las partículas: La forma de las partículas de superficie rugosa o las planas y alargadas requieren más agua para producir concreto manejable que los agregados redondeados o con partículas cuboides. Por tanto, las partículas del agregado que son angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Sin embargo, cuando la gradación es buena, tanto los agregados triturados como los no triturados generalmente dan la misma resistencia, siempre que la dosificación del cemento sea la misma.

Las partículas de los agregados deben ser cortas y gruesas y libres de cantidades excesivas de piezas y en forma de placas o alargadas. Las piezas en forma de astillas, largas, en los agregados se deben

evitar, o cuando menos limitarse a un máximo del 15% en peso del agregado total.

Este requisito es igualmente importante para agregado fino triturado, ya que la piedra triturada con frecuencia contiene más partículas planas y alargadas.

Peso Unitario: El peso unitario de un agregado es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado, es decir la masa neta del agregado en el recipiente dividida entre su volumen, expresado en kg/m^3 .

Peso Específico: El peso específico de un agregado es la relación de su peso al peso de un volumen igual de agua. Se usa en algunos cálculos para el control y proyecto de mezclas. La mayor parte de los agregados de peso normal tienen pesos específicos comprendidos entre 2400 kg/m^3 y 2900 kg/m^3 .

Sustancias Perjudiciales en los agregados: Las sustancias perjudiciales en los agregados pueden ser las siguientes:

Tabla 6. Sustancias perjudiciales en los agregados.

Sustancias perjudiciales	Efecto sobre el concreto
Impurezas orgánicas	Afectan el fraguado y el endurecimiento, y pueden producir deterioro
Materiales más finos que el tamiz # 200	Afectan la adherencia y aumentan la cantidad de agua necesaria
Carbón de piedra, lignito u otros materiales ligeros	Afectan la durabilidad, y pueden producir manchas
Partículas blandas	Afectan la durabilidad
Partículas frágiles	Afectan la manejabilidad y durabilidad

2.3 Agua

Para la preparación de la mezcla se puede utilizar casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga sabor u olor pronunciado; sin embargo, en las zonas de construcción no siempre se dispone de agua con esas características, y por ello se utilizan aguas de diferentes tipos, lo cual se puede reflejar en las propiedades del concreto. Entre las aguas que se utilizan, a parte del agua potable, tenemos aguas turbias (con arcillas), aguas negras (con residuos orgánicos), agua de mar, aguas cloruradas, carbonatadas, sulfatadas, aguas ácidas, aguas alcalinas, entre otras.

A continuación en la **Tabla 7** se sintetiza el efecto de los diferentes componentes del agua en las propiedades del concreto.

Tabla 7. Componentes en el agua y sus efectos.

COMPONENTES DEL AGUA DE MEZCLA	EFFECTOS
Impurezas sólidas (arcillas o partículas finas de otros minerales) en concentraciones > 2000 ppm	Pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia
Impurezas orgánicas (aguas negras, verde, café)	Pueden afectar considerablemente el tiempo de fraguado y la resistencia
Agua de mar Aguas cloruradas	Corrosión del acero de refuerzo. Eflorescencias y humedad en superficies expuestas al aire y al agua
Carbonato de sodio	Fraguados muy rápidos Puede reducir la resistencia
Bicarbonatos	Pueden acelerar o retardar el fraguado Pueden reducir la resistencia
Sulfatos	Posibles reacciones expansivas y deterioros por reacción
Sales de estaño, zinc, cobre, plomo y magnesio	Pueden provocar reducción considerable de resistencia y también grandes variaciones en el tiempo de fraguado
Yodato de sodio, fosfato de sodio, arsenato de sodio y borato de sodio	Sales especialmente retardantes
Aguas ácidas de minas (ácidos clorhídrico, sulfúrico y otros en concentraciones mayores a 10000 ppm)	Pueden ocasionar problemas de manejo
Aguas alcalinas Hidróxido de sodio o de potasio	Puede reducir la resistencia

2.4 Aditivos

2.4.1 Generalidades

En esta investigación se hizo uso del aditivo Plastiment TM 30 donado por la empresa SIKA PERÚ. Este es un aditivo plastificante exento de cloruros que produce en el concreto un aumento considerable en su trabajabilidad, es ideal para concretos que necesitan una buena manejabilidad en el tiempo. Es de aspecto líquido y color pardo oscuro.

2.4.2 Definición

Aditivos son sustancias que se agregan a la mezcla de concreto para modificar una o varias de sus propiedades de manera prevista y controlada. Pueden ser de diferentes tipos:

Incorporadores de aire.- Originan aire en el concreto o mortero, con el fin de aumentar la trabajabilidad, la resistencia al congelamiento del concreto y la impermeabilidad.

Reductores de agua.- Reducen la cantidad de agua de mezcla necesaria.

Retardantes.- Retardan el fraguado, con el fin de mantener el concreto trabajable por más tiempo.

Acelerantes.- Aceleran el fraguado y el desarrollo de la resistencia del concreto a edad temprana.

Plastificantes.- Permite disminuir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia deseada del concreto. Actúan como plastificantes y retardantes a la vez.

Existen otros tipos de aditivos como los plastificantes-acelerantes, superplastificantes, superplastificantes-retardantes, aditivos minerales, aditivos de pega y aditivos reductores de permeabilidad, entre otros.

2.5 Fibras

2.5.1 Fibra sintética

Las fibras sintéticas son artificiales; resultan de la investigación y desarrollo en las industrias petroquímica y textil. Existen dos formas físicas diferentes de fibras: la de monofilamentos, y las producidas de cintas de fibrilla. La mayoría de las aplicaciones de las fibras sintéticas están en el nivel de 0.1% por volumen. A ese nivel, se considera que la resistencia del concreto no se ve afectada y se buscan las características de control de las grietas.

Los tipos de fibras que han sido ensayados en las matrices de concreto de cemento incluyen: acrílico, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno.

2.5.1.1 Fibra Fibermesh

Las fibras de polipropileno Fibermesh le dan al concreto un refuerzo secundario multidimensional. El resultado es un sistema de refuerzo distribuido de manera uniforme que siempre está posicionado

correctamente para combatir el agrietamiento en estado plástico. Estas fibras pueden inhibir de 80% a 100% el agrietamiento intrínseco.

Se mezcla completamente en el concreto sin afectar la hidratación química del concreto y son compatibles con todos los diseños de concretos y aditivos.



Foto 2. Fibra Fibermesh

Tabla 8. Propiedades de las fibras Fibermesh.

Absorción	Ninguna
Gravedad Especifica	0.9
Longitudes (pulgadas)	1/8, 1/4, 1/2, 1 1/2, 2
Longitudes (mm)	3, 6, 12, 19, 38, 51
Punto de ignición	590 °C
Conductividad térmica	Baja
Resistencia a ácidos y sales	Alta
Punto de fusión	160 °C a 170 °C
Resistencia a álcalis	100% resistente

2.5.2 Fibra natural

A partir de que las fibras de asbesto fueron relacionadas con potenciales peligros para la salud se inició la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionaran al concreto las propiedades tan favorables que el asbesto le daba, además de ser competitivos en calidad y precio.

Las fibras de acero, de vidrio y más recientemente las de polipropileno, son alternativas viables para reforzar al concreto. Sin embargo, otro grupo

de fibras llamadas naturales (vegetales o animales) han sido motivo de varios estudios para su posible aplicación como refuerzo del concreto.

Las fibras naturales están disponibles razonablemente en grandes cantidades en muchos países en desarrollo y representan una fuente renovable continua. Perú es un país que posee abundante producción de fibras naturales.

2.5.2.1 Fibra de origen animal (pluma de aves)

Las plumas de aves fueron obtenidas en puestos de venta de pollo en los mercados. Estas fibras fueron lavadas con abundante agua, secadas al sol y escogidas discriminando las plumas que sobrepasaran los 10 cm. Las plumas no recibieron ningún tratamiento químico.



Foto 3. Plumas lavadas.



Foto 4. Secado de plumas al sol.



Foto 5. Selección de plumas por tamaño.

CAPÍTULO III

ENSAYOS REALIZADOS

3.1 Ensayos en estado fresco

3.1.1 Medición del asentamiento (Slump)

A continuación se resume las prescripciones de la norma ASTM C143 y NTP 339.035:

1. La varilla debe ser una barra lisa de 5/8" con punta semiesférica.
2. Las herramientas deben estar limpias y húmedas.
3. El cono se fija firmemente pisando sus las aletas inferiores.
4. Se debe llenar en 3 Capas de igual volumen.
5. Cada capa debe ser compactada con 25 varilladas en forma espiral.
6. La capa inferior se compacta en todo su espesor. En las capas siguientes penetrará toda su profundidad y aproximadamente 1" de la capa inferior.

7. Al compactar la capa superior se debe mantener el concreto sobrepasando el tope del molde.
8. Enrasar usando la barra compactadora o plancha de albañilería. Colocar las manos en la asas del cono y transferir el peso del cuerpo, de los pies a las manos. Retirar los pies, presionando en todo momento hacia abajo con las manos. Levantar el cono, demorándose en esta operación 5 ± 2 segundos. Colocar el cono invertido al lado del concreto deformado.
9. El tiempo máximo del ensayo será 2.5 minutos.
10. Medir la distancia entre la altura del molde y el centro de la cara superior del concreto, con una aproximación de $1/4$ ".



Foto 6. Medición del Slump

TABLA 9. Cuadro comparativo de asentamiento (Slump).

		DOSIFICACIÓN DE FIBRA								
		300 g/m ³		500 g/m ³		900 g/m ³		1200 g/m ³		
		PATRON (pulgadas)	SLUMP (pulgadas)	INCREMENTO (%)	SLUMP (pulgadas)	INCREMENTO (%)	SLUMP (pulgadas)	INCREMENTO (%)	SLUMP (pulgadas)	INCREMENTO (%)
TIPO DE FIBRA										
FIBERMESH	5	4 1/2	90	3 3/4	75	3 1/4	65	1/2	10	
PLUMAS DE AVES	5	4 1/4	85	3 1/2	70	3	60	0	0	

NOTA 1: EI SLUMP SE MIDIO DESPUES DE AÑADIDA LA FIBRA.

NOTA 2: EL INCREMENTO DEL SLUMP ES TENIENDO COMO BASE EL 100% DEL SLUMP DEL CONCRETO PATRÓN.

NOTA 3: PARA LA DOSIFICACION DE 1200 g/m³ LA TRABAJABILIDAD DE LA MEZCLA FUE NULA.

3.1.2 Determinación del peso unitario y rendimiento

A continuación se resume las prescripciones de la norma ASTM C138 y NTP 339.046:

1. El tamaño máximo de los agregados debe ser 1 ½ pulgadas.
2. Las herramientas deben estar limpias y húmedas.
3. La comba de goma será de 600 gramos.
4. Se debe verificar el peso de la olla en la balanza y se debe anotar el peso y el volumen.
5. Se llena en 3 capas de igual altura.
6. Se efectúan 25 varilladas por cada capa.
7. Se aplican entre 10 a 15 golpes laterales con el martillo de goma, para cada capa.
8. Una vez llenado el molde, se enrasa con la regla metálica y se limpia todo el molde.
9. Se pesa el recipiente más el concreto en la balanza electrónica.

$$P.U = \frac{\text{Pesodelconcreto}}{\text{Volumendelaolla}} = \frac{\text{Pesoollamasconcreto} - \text{Pesoolla}}{\text{Volumendelaolla}} (\text{kg} / \text{m}^3)$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Pesodelosmateriales.} (\text{kg} / \text{m}^3)}{\text{Pesounitariodelconcreto.} (\text{kg} / \text{m}^3)}$$



Foto 7. Enrazado de olla.

Tabla 10. Cuadro comparativo de peso unitario.

TIPO DE FIBRA	PATRÓN (kg/m ³)	DOSIFICACIÓN DE FIBRA							
		300 g/m ³		500 g/m ³		900 g/m ³		1200 g/m ³	
		PESO UNITARIO (kg/m ³)	INCREMENTO (%)						
FIBERMESH	2376	2343	99	2340	98	2338	98	-	-
PLUMAS DE AVES	2376	2352	99	2348	99	2345	99	-	-

Tabla 11. Cuadro comparativo de rendimiento.

TIPO DE FIBRA	PESO UNITARIO TEÓRICO (kg/m ³)	DOSIFICACIÓN DE FIBRA									
		PATRÓN		300 g/m ³		500 g/m ³		900 g/m ³		1200 g/m ³	
		PESO UNITARIO REAL (kg/m ³)	RENDIM.								
FIBERMESH	2381	2376	1.00	2343	1.02	2340	1.02	2338	1.02	-	-
PLUMAS DE AVES	2381	2376	1.00	2352	1.01	2348	1.01	2345	1.02	-	-

NOTA 1: EL INCREMENTO DEL PESO UNITARIO ES TENIENDO COMO BASE EL 100% DEL PESO UNITARIO DEL CONCRETO PATRÓN.

NOTA 2: PARA LA DOSIFICACION DE 1200 g/m³ LA TRABAJABILIDAD DE LA MEZCLA FUE NULA ES POR ESO QUE NO SE REGISTRARON CARACTERÍSTICAS.

3.1.3 Medición del contenido de aire (%)

Este ensayo se realiza a continuación del ensayo de Peso Unitario siguiendo los pasos complementarios siguientes:

1. Asegurar la tapa al molde, cerrando todos los seguros.
2. Cerrar la válvula de purga de aire del pistón.
3. Abrir las válvulas para el ingreso del agua al molde.
4. Inyectar agua en una de las válvulas, hasta que emerja por la otra. Se continúa inyectando agua, mientras se agita suavemente el conjunto, hasta que todo el aire haya salido por la otra válvula.
5. Cerrar las válvulas de agua, de forma que el recipiente quede hermético.
6. Bombear aire, con el pistón gradualmente hasta que la aguja del manómetro señale la presión inicial.
7. Abrir la válvula de aire para liberar la presión dentro del molde.
8. Tomar la lectura del manómetro y expresarla en porcentaje.
9. Abrir la válvula de purga del pistón para dejar salir el aire a presión.
10. Abrir las válvulas laterales para evacuar el remanente de aire.

11. Una vez evacuado todo el aire, abrir los seguros y remover la tapa.
12. Desechar el concreto del molde. Este concreto no debe ser usado para elaborar probetas o tomar muestras de ningún tipo.



Foto 8. Medición del contenido de aire.

Tabla 12. Cuadro comparativo de contenido de aire (%).

TIPO DE FIBRA	DOSIFICACIÓN DE FIBRA								
	PATRÓN	300 g/m ³		500 g/m ³		900 g/m ³		1200 g/m ³	
	CONTENIDO AIRE (%)	CONTENIDO AIRE (%)	INCREMENTO (%)	CONTENIDO AIRE (%)	INCREMENTO (%)	CONTENIDO AIRE (%)	INCREMENTO (%)	CONTENIDO AIRE (%)	INCREMENTO (%)
FIBERMESH	2.4	2.5	104	2.5	104	2.6	108	-	-
PLUMAS DE AVES	2.4	2.4	100	2.4	100	2.5	104	-	-

NOTA 1: EL INCREMENTO DEL CONTENIDO DE AIRE ES TENIENDO COMO BASE EL 100% DEL CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO PATRÓN.

NOTA 2: PARA LA DOSIFICACION DE 1200 g/m³ LA TRABAJABILIDAD DE LA MEZCLA FUE NULA ES POR ESO QUE NO SE REGISTRARON CARACTERÍSTICAS.

3.1.4 Medición de la temperatura

A continuación se resume las prescripciones de la norma ASTM C1064 y NTP 339.184:

1. El sensor de temperatura será cubierto al menos 7.5 cm (3") de concreto en todas las direcciones.
2. El sensor debe estar cubierto 2,5 minutos o hasta que se estabilice la temperatura.
3. Debe tener una aproximación de 0.5 °C.
4. La temperatura debe estar entre el rango de -18°C y 50°C .



Foto 9. Medición de la temperatura del concreto.

Tabla 13. Cuadro comparativo de temperatura (°C).

TIPO DE FIBRA	DOSIFICACIÓN DE FIBRA									
	PATRÓN		300 g/m ³		500 g/m ³		900 g/m ³		1200 g/m ³	
	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. CONCRETO (°C)	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. CONCRETO (°C)	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. CONCRETO (°C)	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. CONCRETO (°C)	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. CONCRETO (°C)
FIBERMESH	20.5	20.5	21.5	22.0	20.5	20.5	21.5	21.5	-	-
PLUMAS DE AVES	20.5	20.5	20.5	20.5	21.0	21.5	21.5	21.5	-	-

NOTA 1: PARA LA DOSIFICACION DE 1200 g/m³ LA TRABAJABILIDAD DE LA MEZCLA FUE NULA ES POR ESO QUE NO SE REGISTRARON CARACTERÍSTICAS.

3.1.5 Muestreo de probetas

A continuación se resume las prescripciones de la norma ASTM C31 y NTP 339.033:

1. Se usaron moldes plásticos de 4" de diámetro y 8" de altura.
2. Las herramientas deben estar limpias y húmedas.
3. Se llena en 2 capas de igual altura.
4. Se efectúan 25 varilladas con una varilla de 3/8" por cada capa. La capa inferior se compacta en todo su espesor. En la capa siguiente penetrará toda su profundidad y aproximadamente 1" de la capa inferior.
5. Se aplican entre 10 a 15 golpes laterales con un martillo de goma de 600 gramos para cada con la finalidad de eliminar burbujas de aire atrapado y cerrar los espacios dejados al compactar.
6. Al compactar la capa superior se debe mantener el concreto sobrepasando el tope del molde.
7. Una vez llenado el molde, se enrasa con una regla metálica o plancha.

3.1.6 Muestreo de vigas

A continuación se resume las prescripciones de la norma ASTM C31 y NTP 339.033:

1. Se usaron moldes metálicos de 6" x 6" de sección transversal y 20" de longitud.
2. Las herramientas deben estar limpias y húmedas.
3. Se llena en 2 capas de igual altura.
4. Se efectúan 54 varilladas con una varilla de 5/8" por cada capa. La capa inferior se compacta en todo su espesor. En la capa siguiente penetrará toda su profundidad y aproximadamente 1" de la capa inferior.
5. Se aplican entre 10 a 15 golpes laterales con un martillo de goma de 600 gramos para cada con la finalidad de eliminar burbujas de aire atrapado y cerrar los espacios dejados al compactar.
6. Una vez llenado el molde, se enrasa con una regla metálica o plancha.

3.2 Ensayos en estado endurecido

3.2.1 Resistencia a la compresión

A continuación se resume las prescripciones de la norma ASTM C39 y NTP 339.034:

1. Se requiere una máquina de ensayo capaz de mantener la velocidad de carga continua y uniforme.
2. Se mide el diámetro y la altura de la probeta cilíndrica con una aproximación de 0.1mm con un calibrador micrométrico.
3. Se coloca la probeta sobre el bloque inferior de apoyo y se centra sobre el mismo.
4. Se aplica la carga en forma continua y constante evitando choques. La velocidad de carga estará en el rango de 0.14 a 0.34 MPa/s.
5. Se anota la carga máxima, el tipo de rotura y además toda otra observación relacionada con el aspecto del concreto.

6. Cálculo:

$$R = \frac{P}{A}$$

Donde:

R = Resistencia a la compresión (kg/cm²)

P = Carga máxima (kg)

A = Sección normal a la carga (cm²)



Foto 10. Ensayo a compresión.

Tabla 14. Cuadro comparativo de Resistencia a la compresión.

TIPO DE FIBRA	EDAD (días)	PATRÓN (kg/cm ²)	DOSIFICACIÓN DE FIBRA							
			300 g/m ³		500 g/m ³		900 g/m ³		1200 g/m ³	
			RESISTENCIA (kg/cm ²)	INCREMENTO (%)						
Fibermesh	3	177	177	100	174	98	178	101	-	-
	7	228	231	101	230	101	244	107	-	-
	28	293	298	102	292	100	291	99	-	-
	45	293	305	104	293	100	306	104	-	-
Pluma de aves	3	177	174	98	172	97	166	94	-	-
	7	228	232	102	214	94	215	94	-	-
	28	293	287	98	272	93	267	91	-	-
	45	293	298	102	275	94	269	92	-	-

NOTA 1: EL INCREMENTO DEL CONTENIDO DE AIRE ES TENIENDO COMO BASE EL 100% DEL CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO PATRÓN.

NOTA 2: PARA LA DOSIFICACION DE 1200 g/m³ LA TRABAJABILIDAD DE LA MEZCLA FUE NULA ES POR ESO QUE NO SE REGISTRARON CARACTERÍSTICAS.

3.2.2 Resistencia a la flexión

A continuación se resume las prescripciones de la norma ASTM C78 / C293 y NTP 339.078/ 339.079:

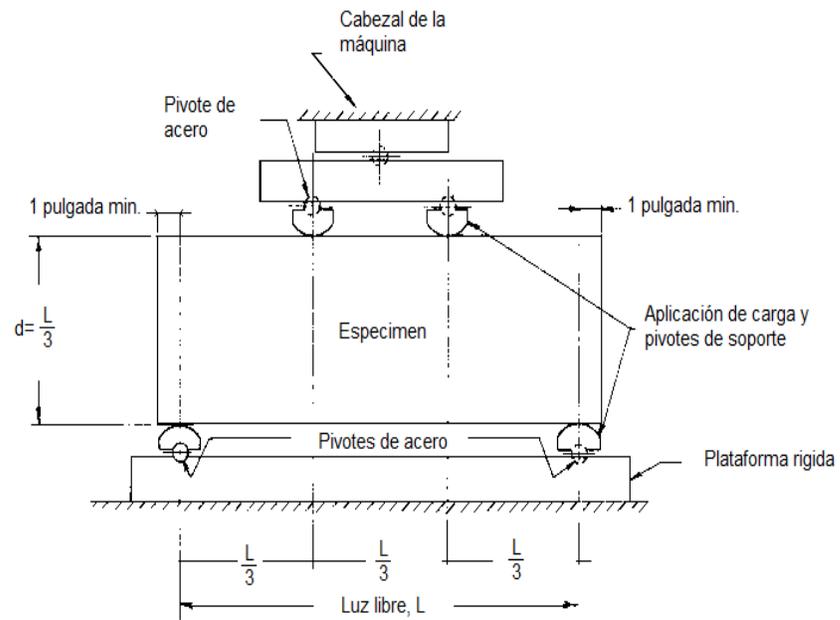


Figura 19. Esquema del ensayo.

1. Se marcan los especímenes de concreto como se muestra en la **Figura 19**.
2. Se coloca en la prensa automática y se ensaya.
3. Cálculo:

$$Mr = \frac{PxL}{bxh^2}$$

Donde:

Mr = Modulo de rotura (kg/cm²)

P = Carga máxima aplicada (kg)

L = Luz libre (cm)

b = Ancho promedio del espécimen

h = Altura promedio del espécimen (cm)

Tabla 15. Cuadro comparativo de resistencia a la flexión.

TIPO DE FIBRA	EDAD (días)	PATRÓN (kg/cm ²)	DOSIFICACIÓN DE FIBRA							
			300 g/m ³		500 g/m ³		900 g/m ³		1200 g/m ³	
			MODULO DE ROTURA (kg/cm ²)	INCREMENTO (%)	MODULO DE ROTURA (kg/cm ²)	INCREMENTO (%)	MODULO DE ROTURA (kg/cm ²)	INCREMENTO (%)	MODULO DE ROTURA (kg/cm ²)	INCREMENTO (%)
Fibermesh	28	27	30	111	30	111	29	107	-	-
Plumas de aves	28	27	30	111	31	115	30	111	-	-

NOTA 1: EL INCREMENTO DEL CONTENIDO DE AIRE ES TENIENDO COMO BASE EL 100% DEL CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO PATRÓN.

NOTA 2: PARA LA DOSIFICACION DE 1200 g/m³ LA TRABAJABILIDAD DE LA MEZCLA FUE NULA ES POR ESO QUE NO SE REGISTRARON CARACTERÍSTICAS.



Foto 11. Ensayo a flexión.

3.3 Ensayo de potencial de fisuración

3.3.1 Introducción

Este ensayo fue diseñado para poder evaluar cuantitativamente el grado de fisuración por contracción plástica en un elemento superficial restringido lateralmente y sometido a un ambiente con una alta tasa de evaporación. El dispositivo de ensayo (**Foto 12**) consta de un molde de 400 x 700 mm de superficie con un espesor de 50 mm. Este espesor fue adoptado en base a las experiencias previas y debido a que las pruebas preliminares con espesores mayores impedían el desarrollo de fisuras. Debe destacarse que tanto la mezcla patrón como las mezclas adicionadas con fibras fueron evaluadas con esta geometría. En cada uno de los 4 lados, se colocaron restricciones compuestas por pernos roscados con una arandela en su extremo de forma de provocar la fisuración en el centro de la losa.



Foto 12. Dispositivo de ensayo.

3.3.2 Mecanismo de fisuración

Que lleva a la fisuración? En la **Figura 20**, el primer esquema representa una barra de concreto de una longitud arbitraria, con un contenido de humedad y a una cierta temperatura. Si la barra es secada o enfriada sin restricción, esta simplemente se contraerá y no desarrollará ningún esfuerzo, así como se indica en el segundo esquema. Sin embargo, si los extremos son restringidos para mantener la longitud original mientras se seca o enfría, como se muestra en la figura entonces la barra desarrollará

esfuerzos de tracción. Esto es casi como si se hubiese permitido que se contraiga libremente y después se haya jalado de regreso a su longitud original. Las flechas son para indicar que esfuerzos de tracción han sido aplicados en los extremos. A medida que el tiempo transcurre, el esfuerzo es gradualmente liberado en cierta medida debido al flujo plástico (Creep). En casos extremos, el flujo plástico puede reducir la tensión como en un tercio (ver siguiente esquema, donde se muestra la fuerza reducida).

A cualquier edad, tanto en el concreto fresco como endurecido, si el esfuerzo neto de tracción supera la resistencia a la tracción, el concreto se fisurará y el esfuerzo se liberará, como se muestra en el último esquema. Este es un ejemplo sencillo, pero ilustra el proceso que se sigue a cualquier escala.

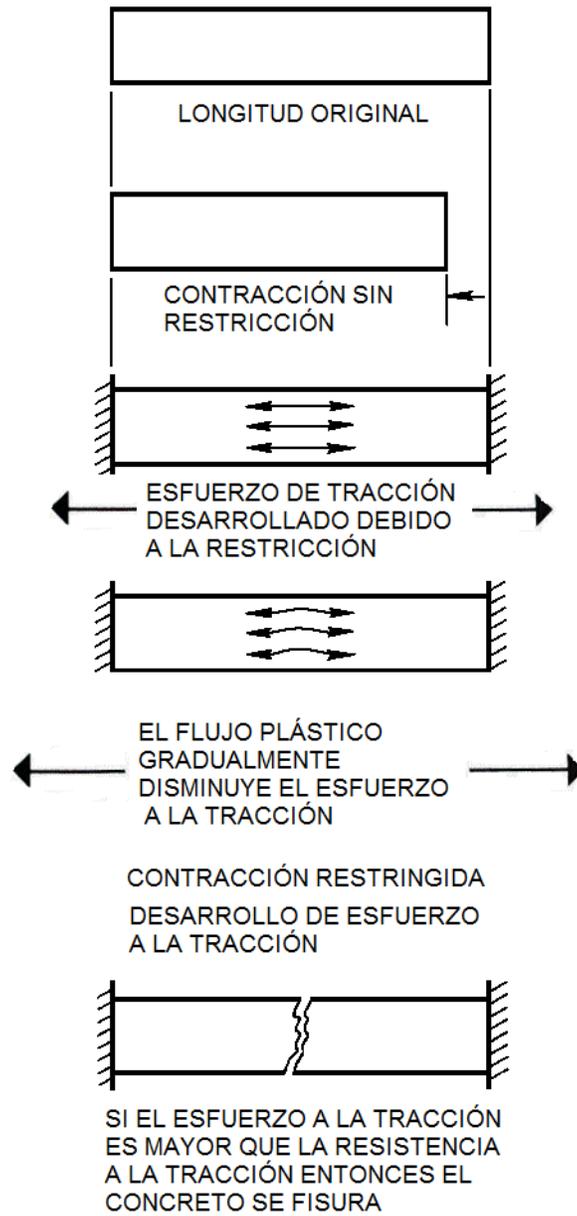


Figura 20. Proceso de desarrollo fisuras.

La continuación del proceso se muestra cualitativamente en la **Figura 21**. Las magnitudes exactas varían con las propiedades del concreto y las condiciones. El eje horizontal representa el paso del tiempo. Los cambios en volumen, esfuerzo, resistencia y flujo plástico (Creep) son representados verticalmente.

En la Curva A, se aprecia que a medida que el tiempo transcurre (hacia la derecha) se produce contracción debido a enfriamiento o secado, representado por la caída en la curva. Simultáneamente se desarrolla un esfuerzo elástico debido a la restricción, esto se muestra en el incremento a lo largo de la Curva B. Además, el flujo plástico se desarrolla simultáneamente. Debido al flujo plástico, el esfuerzo neto de tracción representado en la Curva C es menor que el esfuerzo elástico. La resistencia a la tracción, mientras tanto, esta incrementándose, como se representa en la Curva D. Entonces, si el esfuerzo neto de tracción C alcanza la resistencia a la tracción D, el concreto se fisurara.

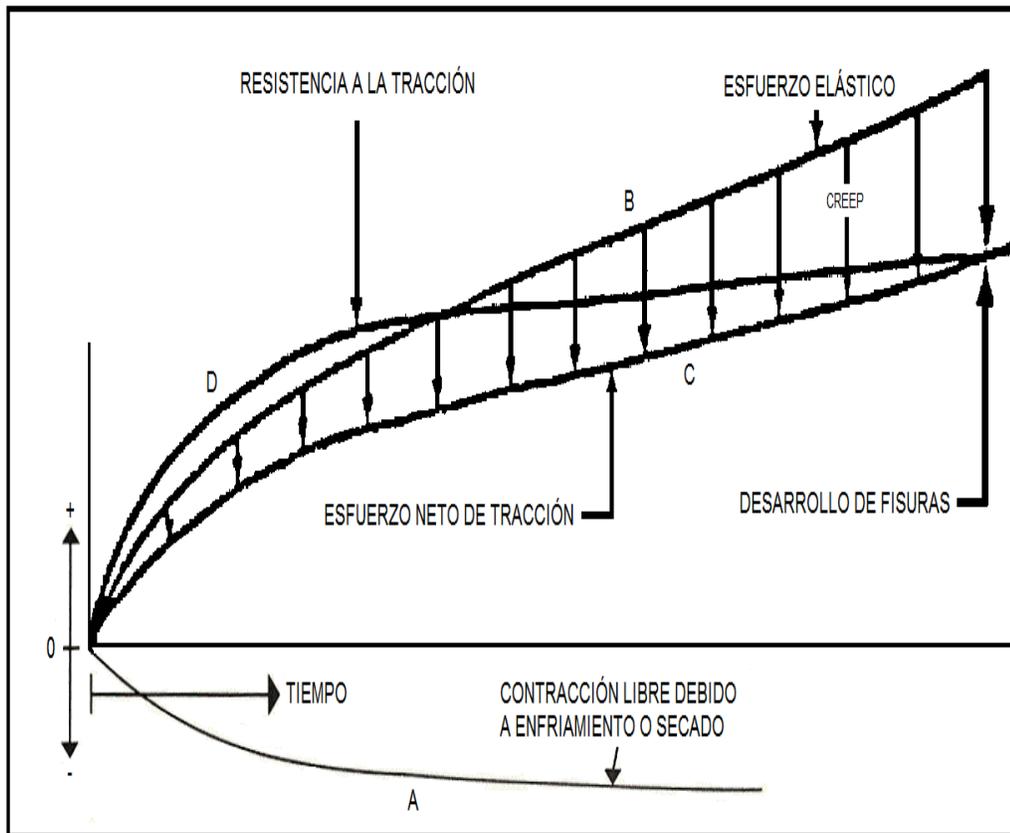


Figura 21. Proceso de desarrollo de fisuras.

3.3.3 Metodología empleada

El ensayo consiste en colocar el concreto en el dispositivo, compactarlo y terminarlo de forma tal de reproducir el método de colocación que posteriormente va a tener en la obra. La temperatura del hormigón fresco en todos los casos se mantuvo en un rango de 21 ± 2 °C.

Luego de moldeada la losa se procede a comenzar con el ensayo dentro de los 15 minutos posteriores a la puesta en contacto entre el cemento y el agua.

Una vez colocado el concreto en estudio, el dispositivo se coloca en un ambiente acondicionado a una temperatura de 22 ± 1 °C y humedad relativa ambiente de 35 ± 5 %. A estas condiciones ambientales se les adicionó un ventilador de alta velocidad capaz de generar vientos del orden de los 24 km/h sobre la superficie de la losa. El ensayo se muestra en la **Foto 13.**



Foto 13. Dispositivo en funcionamiento.

3.3.3 Cálculo de la tasa de evaporación

De acuerdo al grafico del Comité ACI-308 y según estas condiciones, la velocidad de evaporación del agua libre fue de $0,8 \pm 0.2 \text{ kg/m}^2/\text{h}$, es decir bordea el límite que las diferentes recomendaciones consideran suficiente para suspender las tareas de colocación del concreto por ser de alto riesgo de fisuración.

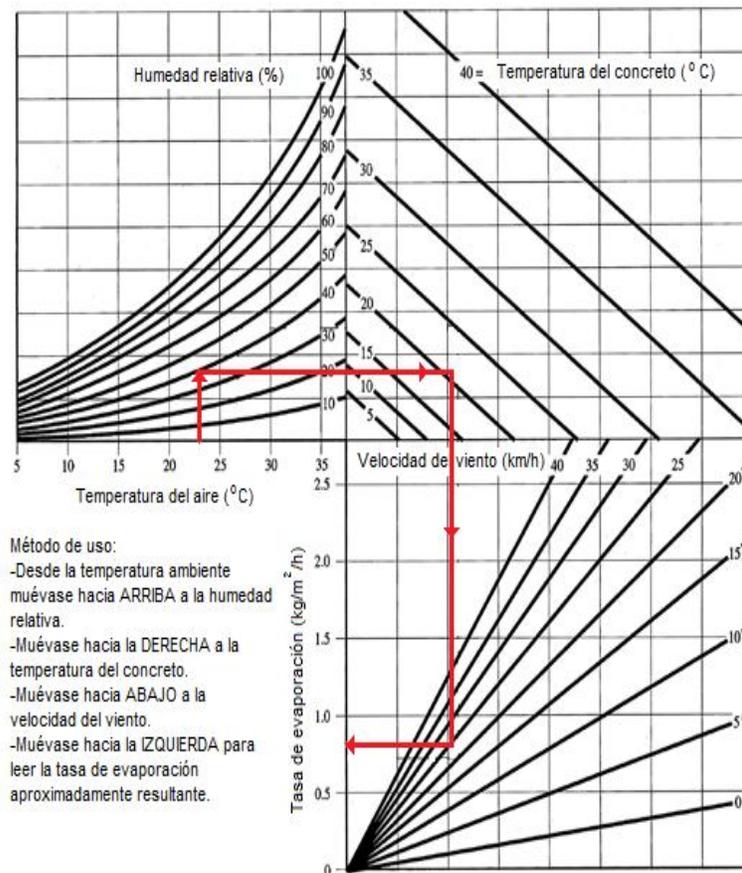


Figura 22. Grafico del Comité ACI-308 para evaluar tasa de evaporación.

3.3.4 Cálculos y resultados

Luego de producida la fisuración plástica y adoptando una duración máxima de ensayo de 2 horas a partir de la colocación del dispositivo en condiciones ambientales de máxima evaporación, se realizan las siguientes operaciones:

En primer término se identifica toda el área fisurada, marcándose todas las fisuras encontradas (**Foto 14**).



Foto 14. Identificación de fisuras.

En segundo lugar, se procede a la medición con un dispositivo óptico (microscopio), una lupa y un comparador de grietas todos los anchos de las fisuras registradas en la losa (**Fotos 15 y 16**).



Foto 15. Comparador de grietas.



Foto 16. Instrumentos de medición.

En tercer lugar, se mide con wincha o regla el desarrollo longitudinal de cada fisura (**Foto 17**).



Foto 17. Medición de la fisura.

Por último, el espesor de las fisuras se clasifica de acuerdo a las categorías mostradas en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Clasificación por ancho de fisura.

ANCHO (mm)	PESO
0.05	1
0.10	2
0.15	3
0.20	4
0.25	5
0.30	6
0.35	7
0.40	8
0.45	9
0.50	10
0.80	11

Para cada espesor de fisura, el peso asignado se multiplica a la longitud total en centímetros de la misma para obtener el valor promedio. La sumatoria de todos los valores promedio representa el potencial de fisuración de la losa.

Por ejemplo, se tiene los siguientes resultados para el panel "CRF-300":

Tabla 17. Resultados del panel.

ESPESOR (mm)	PESO	LONG.TOTAL (cm)	POTENCIAL DE FISURACIÓN
0.25	5	19.70	98.50
0.20	4	6.50	26.00
0.05	1	3.90	3.90
		FINAL	128.40

$$POTENCIAL.DE.FISURACIÓN = \sum (PESO \times LONGITUD.TOTAL)$$

Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 18** donde se informa el resultado individual de ensayo y el promedio de 2 ensayos realizados con el mismo concreto en días diferentes. Esto tiene por objeto mostrar la repetibilidad del método adoptado.

Tabla 18. Ensayo de potencial de fisuración.

MEZCLA EVALUADA	POTENCIAL DE FISURACIÓN			
	M-1	M-2	PROMEDIO	INCREMENTO (%)
PATRÓN	784	774	779	-
CRF-300	118	128	123	16
CRF-500	94	95	95	12
CRF-900	48	49	48	6
CRF-1200	-	-	-	-
CRP-300	381	407	394	51
CRP-500	289	298	293	38
CRP-900	189	204	197	25
CRP-1200	-	-	-	-

NOTA 1: EL INCREMENTO DEL POTENCIAL DE FISURACIÓN ES TENIENDO COMO BASE EL 100% DEL POTENCIAL DE FISURACIÓN DEL CONCRETO PATRÓN.

NOTA 2: PARA LA DOSIFICACION DE 1200 g/m³ LA TRABAJABILIDAD DE LA MEZCLA FUE NULA ES POR ESO QUE NO SE REGISTRARON CARACTERÍSTICAS.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Ensayos en estado fresco

4.1.1 Ensayo de asentamiento (Slump)

Como se aprecia en la **Gráfico 1**, el asentamiento (Slump) del concreto disminuye aproximadamente $\frac{1}{2}$ " , $1 \frac{1}{4}$ " , $1 \frac{3}{4}$ " y $4 \frac{1}{2}$ " con 300, 500, 900 y 1200 g/m³ de fibra sintética (Fibermesh); y disminuye aproximadamente $\frac{3}{4}$ " , $1 \frac{1}{2}$ " , 2" y 5" con 300, 500, 900 y 1200 g/m³ de fibra natural de origen animal (Pluma de aves). Esta pérdida de trabajabilidad se debe a que las fibras forman una red interna y como consecuencia el concreto pierde trabajabilidad.

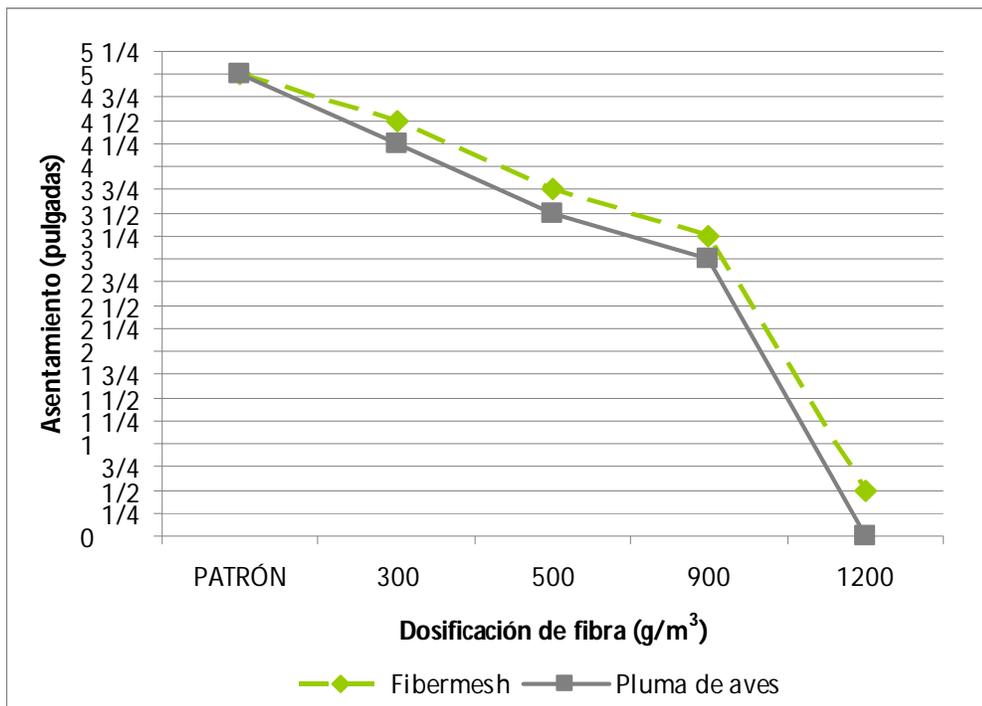


Gráfico 1. Asentamiento vs. Dosificación de fibra.

4.1.2 Ensayo de peso unitario

Como se aprecia en la **Gráfico 2**, los resultados del peso unitario para cada mezcla evaluada sufren una disminución (aligeramiento) a medida que se va incrementando la dosificación de fibra en la mezcla. Esto se debe principalmente a que la fibra atrapa más aire.

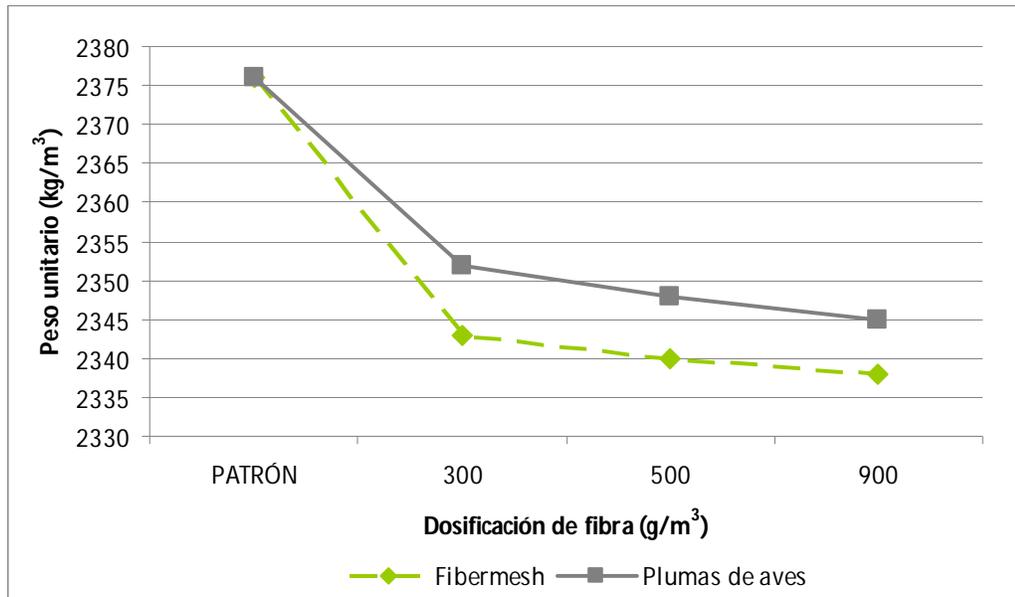


Gráfico 2. Peso unitario vs. Dosificación de fibra.

4.1.3 Ensayo de contenido de aire (%)

Como se muestra en la **Gráfico 3**, el contenido de aire aumenta ligeramente a medida que la dosificación de fibra va aumentando debido a que la fibra forma una red interna atrapando más aire.

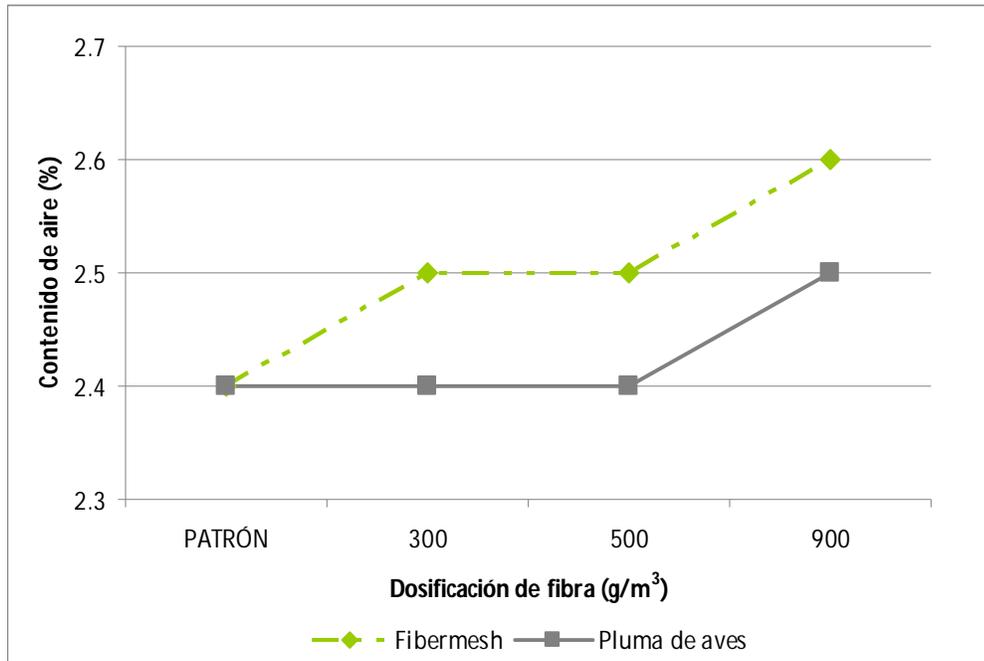


Gráfico 3. Contenido de aire vs. Dosificación de fibra.

4.2 Ensayos en estado endurecido

4.2.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Como se observa en el **Gráfico 4**, el aporte de la fibra sintética (Fibermesh) a la resistencia a la compresión no ha sido significativo.

En el caso de la fibra natural de origen animal (pluma de aves) se puede ver que esta provoca una disminución en la resistencia a la compresión, esto se puede deber quizás al incremento del aire atrapado.

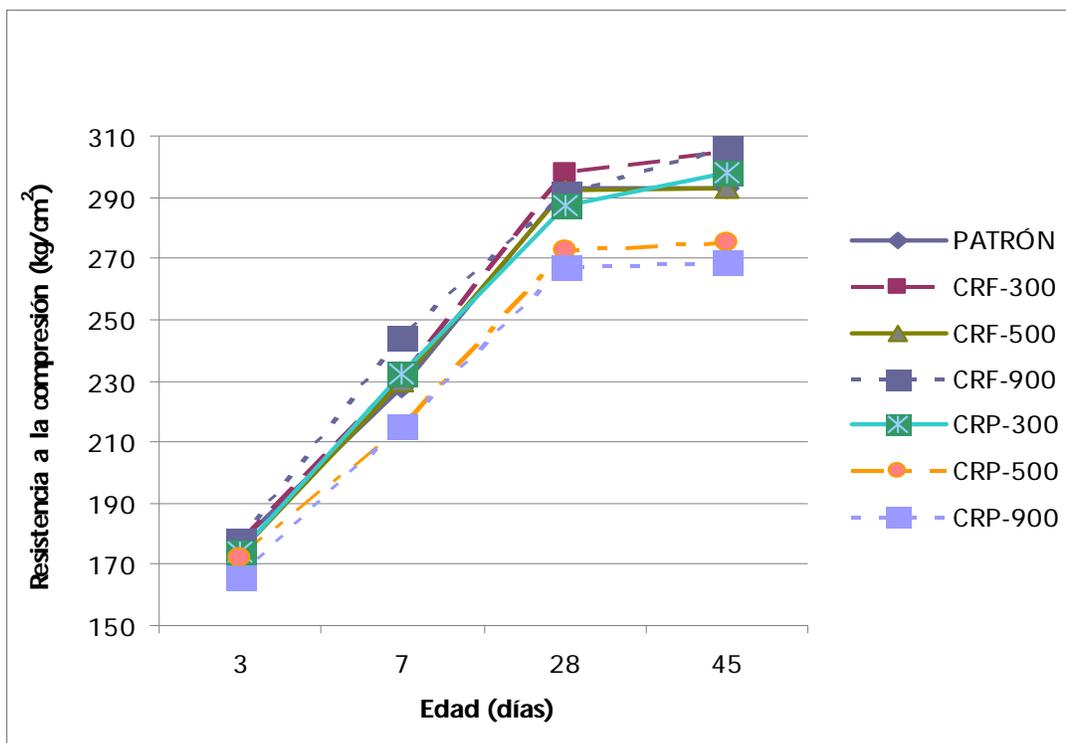


Gráfico 4. Desarrollo de resistencia a la compresión.

Además en la **Gráfico 5**, se observa que la resistencia a la compresión del concreto reforzado con fibra sintética (CRF) siempre fue mayor que el concreto reforzado con plumas (CRP).

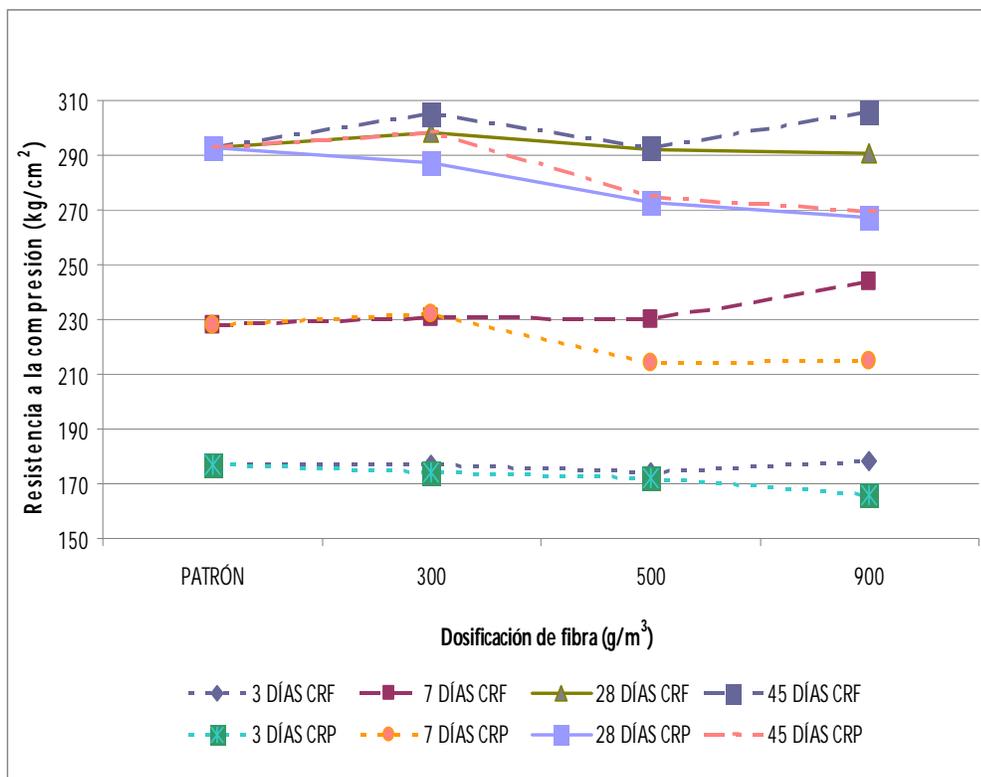


Gráfico 5. Resistencia a la compresión vs. Dosificación de fibra.

4.2.2 Ensayo de resistencia a la flexión

Como se observa en la **Gráfico 6**, la resistencia a la flexión se ve incrementada ligeramente tanto para el concreto reforzado con fibra sintética como con fibra natural de origen animal pero donde se aprecia realmente el trabajo de las fibras es en el aporte de ductilidad que le otorgan al concreto.

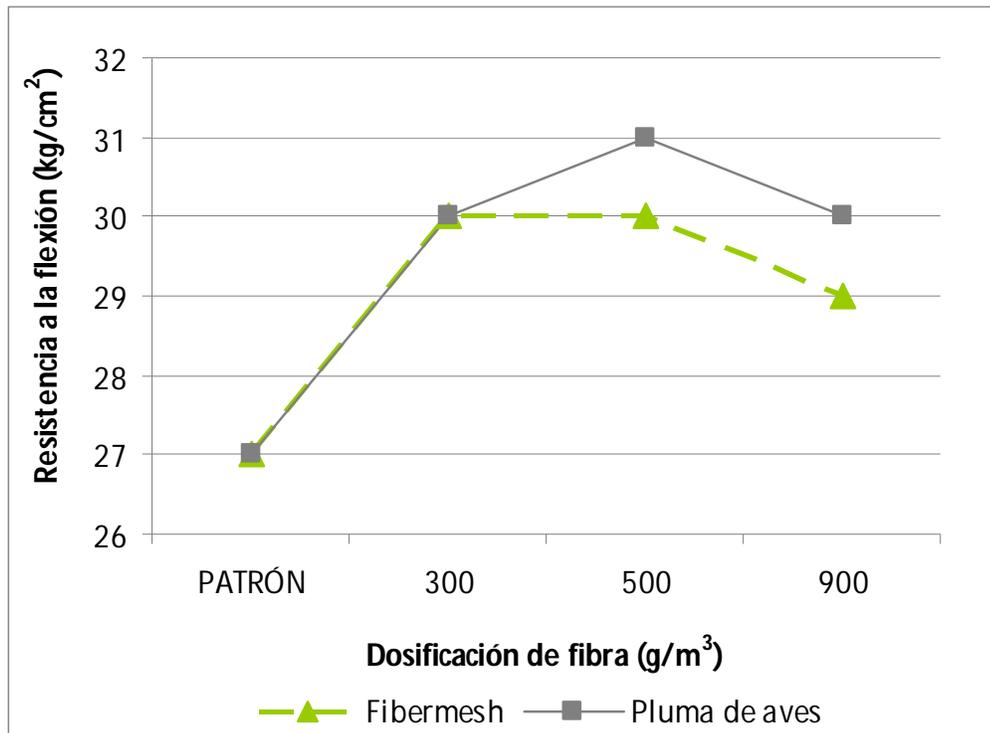


Gráfico 6. Resistencia a la flexión vs. Dosificación de fibra.

4.3 Ensayo de potencial de fisuración

Como se observa en la **Gráfico 7**, la fibra sintética (Fibermesh) inhiben mejor las fisuras causadas por contracción plástica que la fibra natural de origen animal (pluma de aves).

Los resultados nos indican que la fibra sintética logra inhibir las fisuras en 84, 88 y 96 % para dosis de 300, 500 y 900 g/m³ respectivamente. Sin embargo, la fibra natural de origen animal también logra inhibir la fisuración en 49, 62 y 75 %.

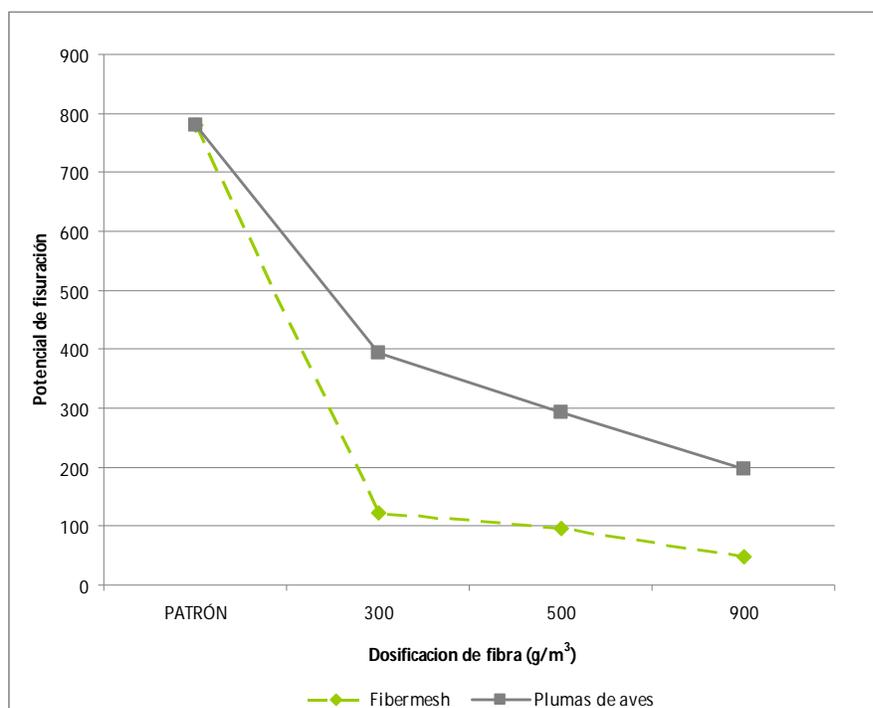


Gráfico 7. Potencial de fisuración vs. Dosificación de fibra.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA

5.1 Análisis de costos

Tabla 19. Cuadro de precios de materiales.

Material	Unidad	Precio (S/.)	Unidad	Precio (S/.)
Cemento	bolsa	16.80	kg	0.395
Agua	m ³	1.31	L	0.0013
Agregado fino	m ³	38.08	kg	0.025
Agregado grueso	m ³	29.75	kg	0.020
Fibermesh	g	0.022	kg	22.33
Pluma de aves	g	0.005	kg	5.00
Plastiment TM 30	L	2.50	L	2.50

Tabla 20. Costo por m³ de concreto.

	Fibermesh (S/.)	Pluma de aves (S/.)
Patrón	157	157
300 g/m³	164	158
500 g/m³	168	159
900 g/m³	177	161
1200 g/m³	-	-

Como se observa en el **Gráfico 8**, el concreto reforzado con fibra sintética (Fibermesh) es más caro que el concreto reforzado con fibra natural de origen animal (Pluma de aves) en cada dosis de fibra.

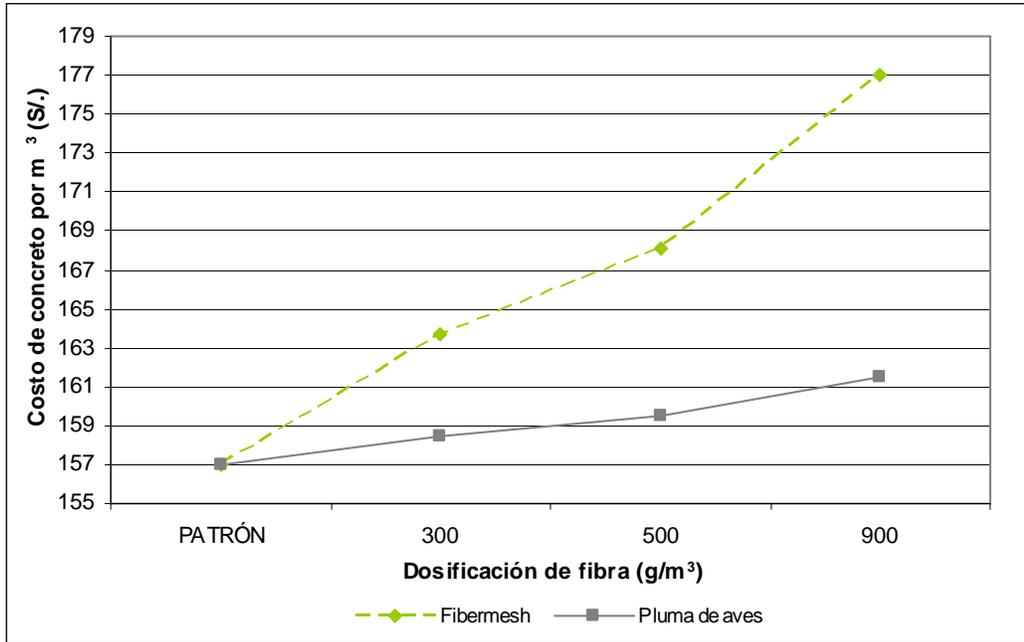


Gráfico 8. Costo por m³ de concreto vs. Dosificación de fibra.

5.2 Análisis costo – beneficio

Para este análisis se tomo en cuenta el potencial de fisuración de cada mezcla, comparándolo con el costo de la misma por metro cúbico.

En el **Gráfico 9** se puede ver que para lograr minimizar la fisuración se necesita emplear mayor dosis de fibra generando incremento en el costo por metro cubico de concreto.

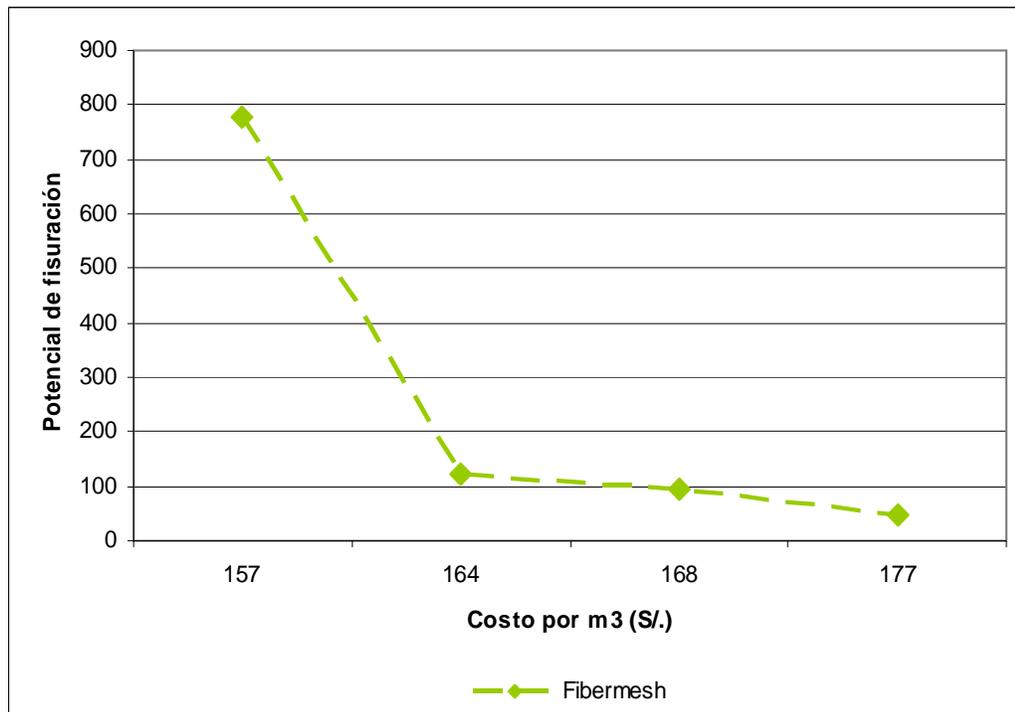


Gráfico 9. Potencial de fisuración vs. Costo por m³ de concreto.

En el **Gráfico 10** podemos notar que para lograr inhibir las fisuras en 75% con respecto al patrón solo se necesito incrementar en el costo por metro cubico de concreto en 2.5%. Este resultado es alentador ya que las condiciones ambientales aplicadas a este ensayo no siempre serán reales y por lo tanto con esta misma mezcla se podría inhibir en su totalidad las fisuras por contracción plástica a un bajo costo.

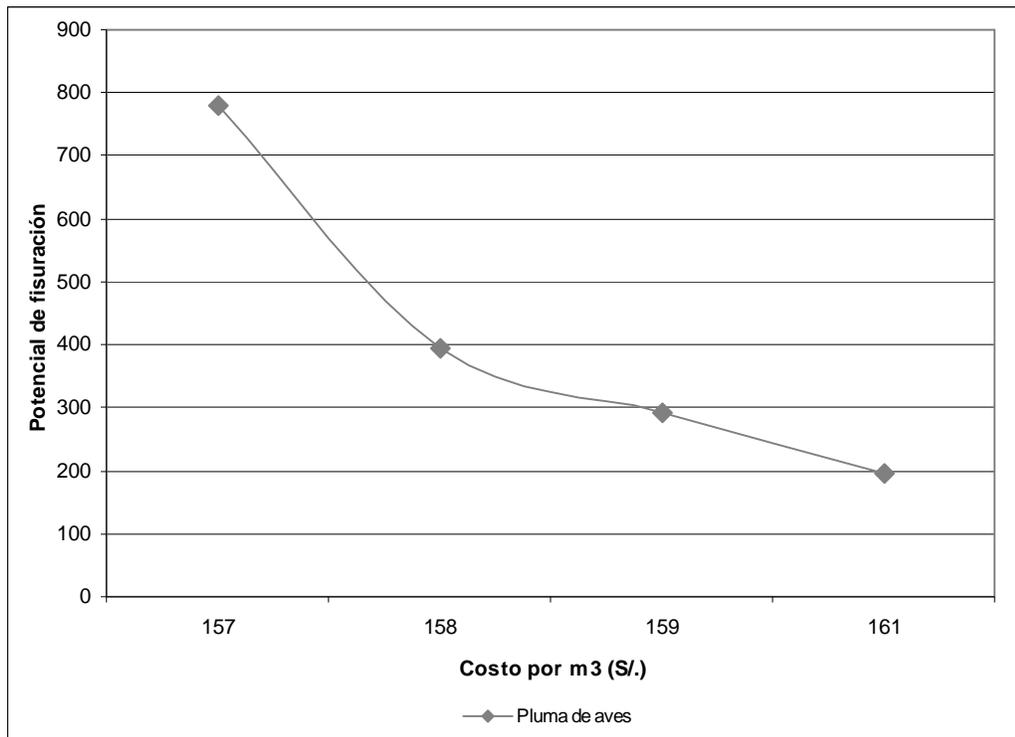


Gráfico 10. Potencial de fisuración vs. Costo por m³ de concreto.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

- El uso de la fibra natural de origen animal (pluma de aves) inhibe efectivamente la formación de fisuras por contracción plástica hasta en un 75% para la dosis de 900 g/m^3 de concreto.

- La fibra sintética (Fibermesh) inhibe la fisuración por contracción plástica hasta en un 96% para la dosis de 900 g/m^3 de concreto.

- La fibra sintética disminuye más eficientemente la fisuración por contracción plástica que la fibra natural de origen animal.

- La incorporación de fibras en el concreto disminuye el asentamiento haciendo el concreto menos trabajable.

- La pérdida casi total de la trabajabilidad en el concreto en la dosis de 1200 g/m^3 se debió a que el aditivo plastificante empleado no fue capaz de romper la red interna formada por la fibra.

- La resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos reforzados con fibra sintética no presentó variación significativa con respecto a la mezcla control. Por otro lado los especímenes reforzados con fibra natural de origen animal presentaron disminución a medida que la dosificación se fue aumentando y esto se debe posiblemente a la posible degradación de la fibra en el concreto.
- La resistencia a la flexión se vio incrementada aproximadamente en 13% para los dos tipos de fibras con respecto a la mezcla control. Pero donde se aprecia mayor trabajo de las fibras es en la ductilidad aportada al concreto después del agrietamiento.
- La fibra natural de origen animal resulto ser más económica que la fibra sintética y esto se debe a que las plumas de aves se encuentran como desperdicio en los centros de acopio y porque para el proceso de limpieza solo se utilizo abundante agua. Además no fueron tratadas químicamente, lo cual incrementaría el costo.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda tratar naturalmente o químicamente la fibra natural con la finalidad de evitar que estas se degraden en el concreto.
- Si se quisiera hacer uso de una dosis mayor de fibra a las empleadas en esta investigación es necesario emplear un superplastificante, el cual permitirá lograr que la mezcla sea más trabajable para su colocación.
- Se sugiere aplicar la fibra natural a escala real en zonas donde exista climas adversos que puedan generar el fenómeno de contracción plástica para ver el comportamiento de estas.

ANEXOS

ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

ANEXO 2

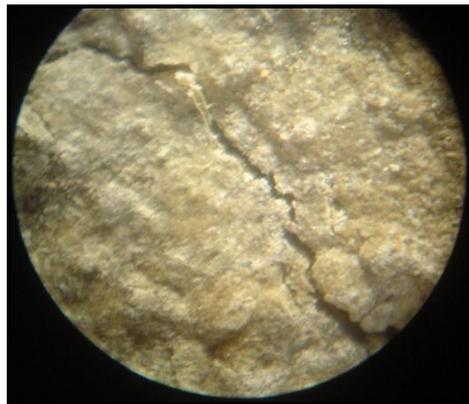
DISEÑO DE MEZCLA

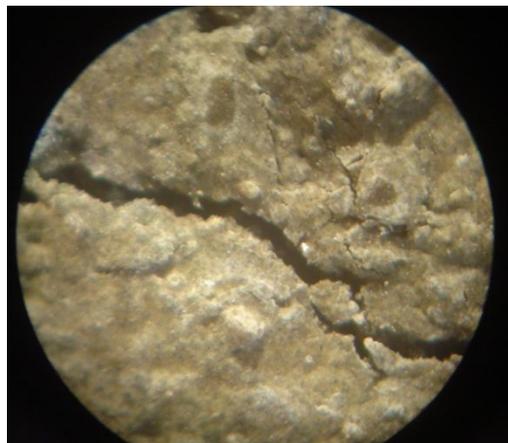
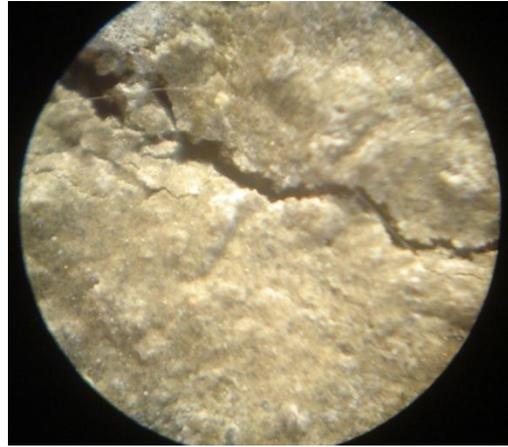
ANEXO 3

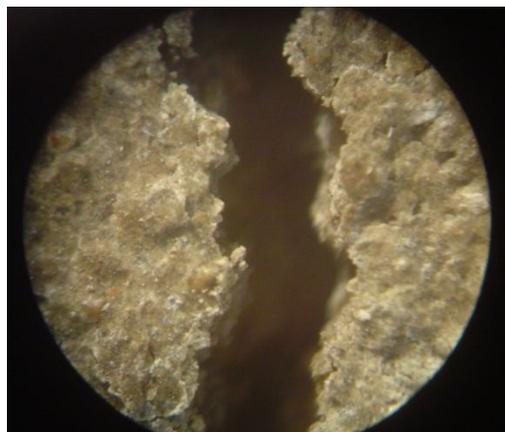
PANEL: PATRÓN

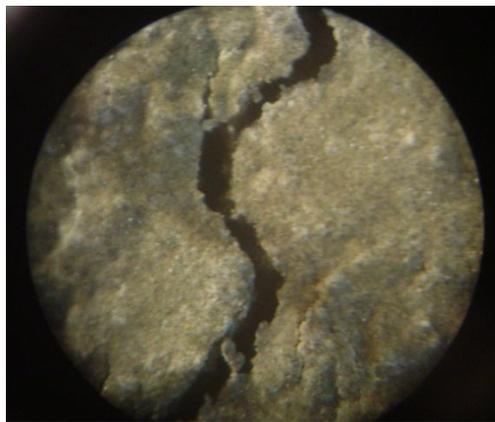
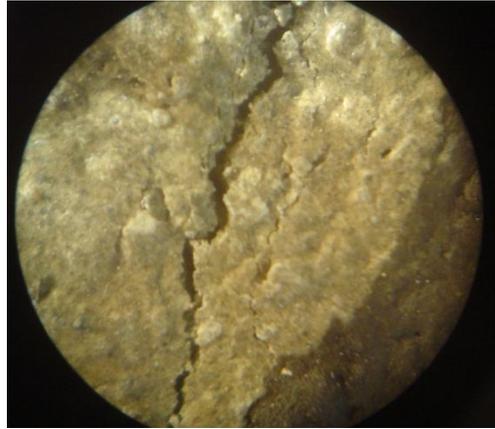


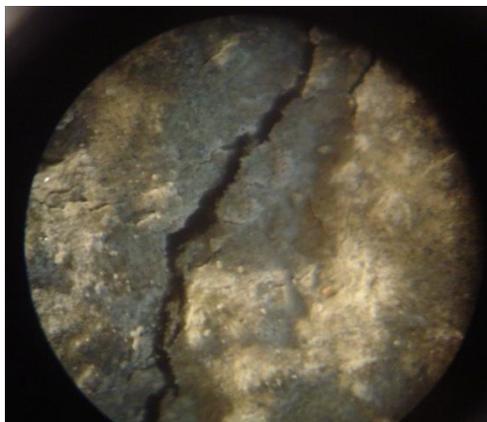
FISURA #	LONGITUD (cm)	ESPELOR (mm)	PESO	POTENCIAL DE FISURACIÓN	%
1	7.50	0.20	4	30.0	4
2	2.10	0.10	2	4.2	1
3	3.80	0.10	2	7.6	1
4	8.00	0.20	4	32.0	4
5	17.20	0.30	6	103.2	13
6	37.50	0.80	11	412.5	53
7	1.50	0.15	3	4.5	1
8	30.00	0.30	6	180.0	23
9	2.50	0.10	2	5.0	1
TOTAL				774.0	100









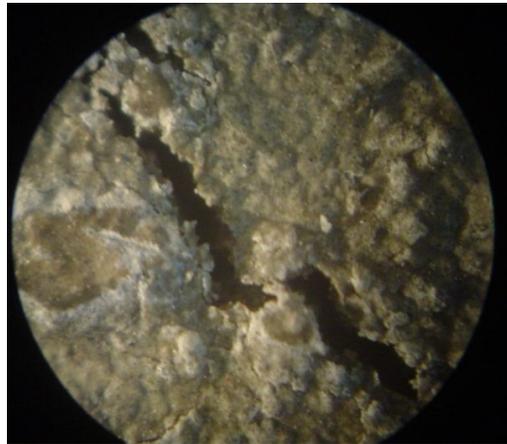
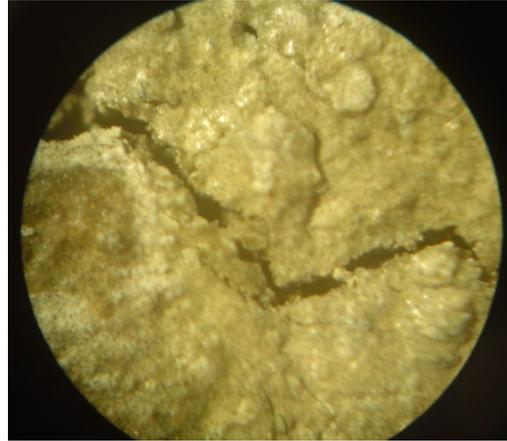


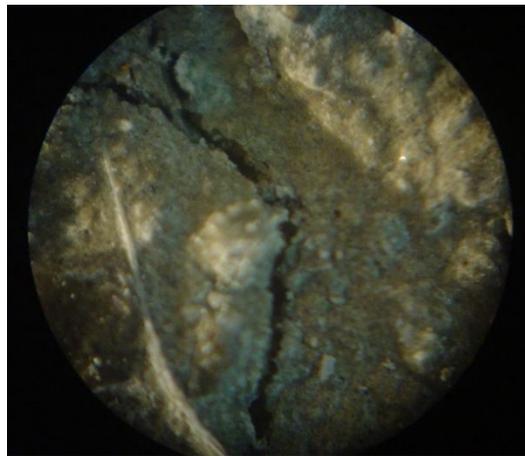
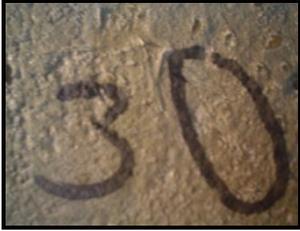
ANEXO 4

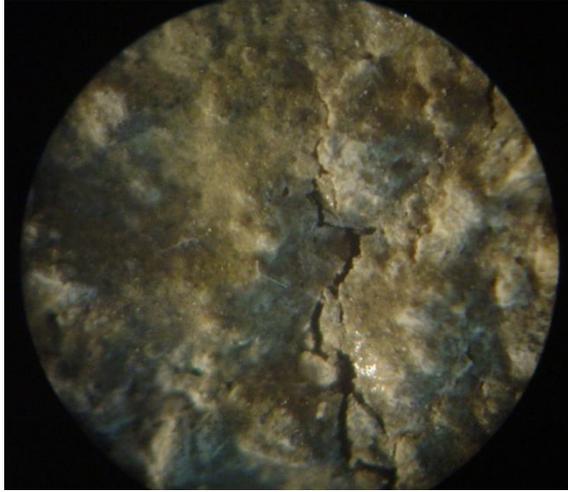
PANEL: CRF-300



FISURA #	LONGITUD (cm)	ESPESOR (mm)	PESO	POTENCIAL DE FISURACIÓN	%
1	2.50	0.20	4	10	8
2	20.30	0.25	5	101.5	79
3	2.00	0.20	4	8	6
4	1.80	0.05	1	1.8	1
5	2.10	0.05	1	2.1	2
			TOTAL	128	100





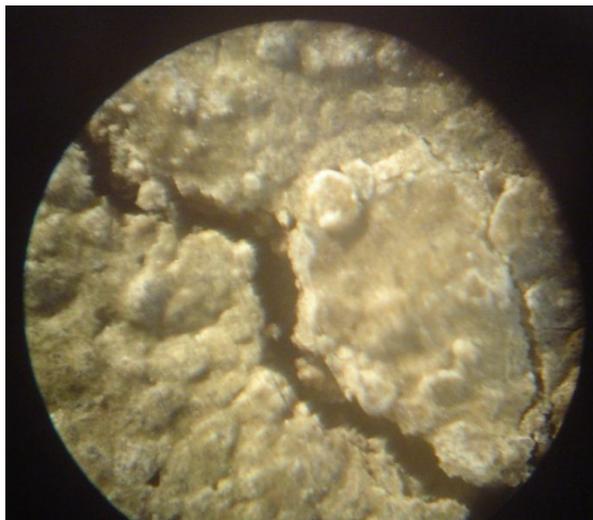


ANEXO 5

PANEL: CRF-500

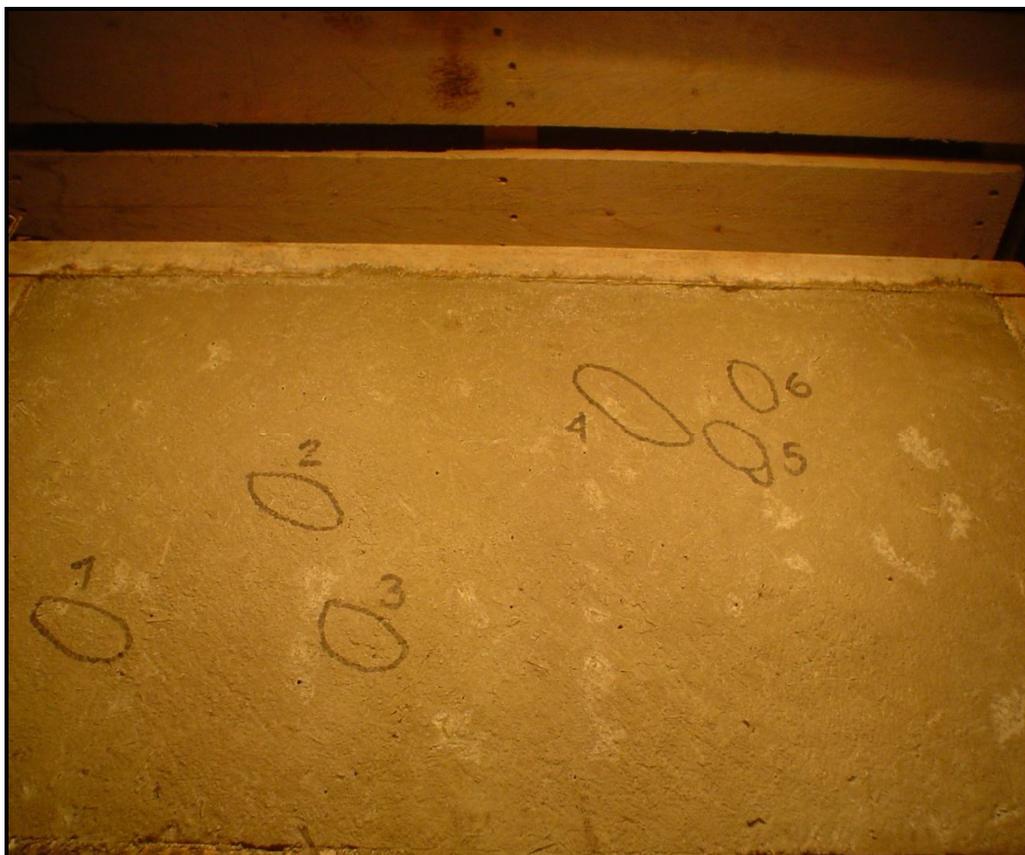


FISURA #	LONGITUD (cm)	ESPEJOR (mm)	PESO	POTENCIAL DE FISURACIÓN	%
1	9.50	0.50	10	95	100
TOTAL				95	100

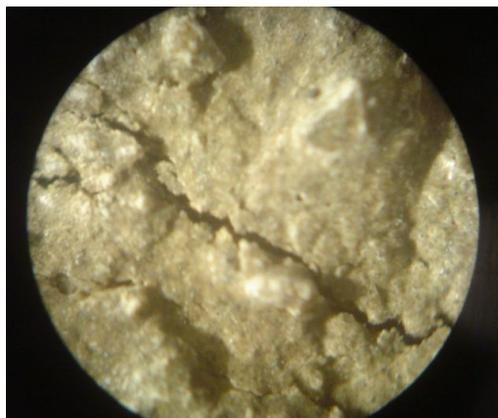
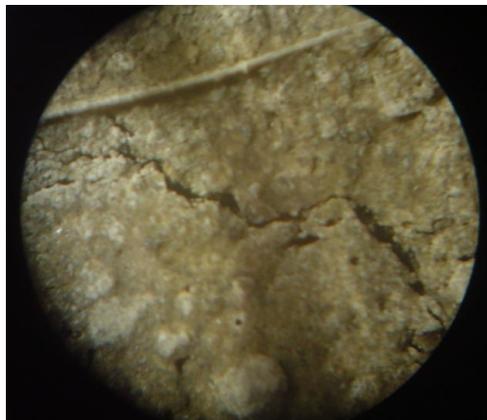


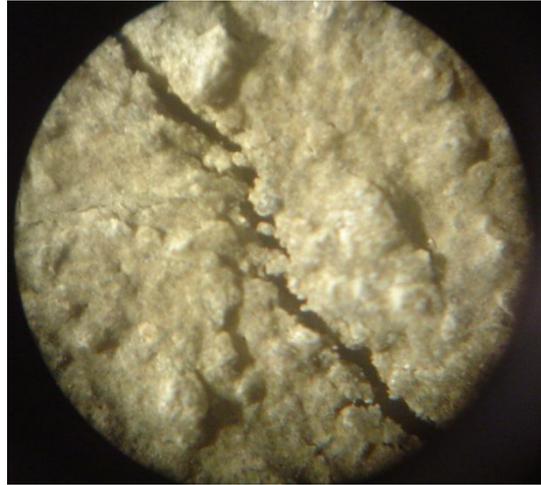
ANEXO 6

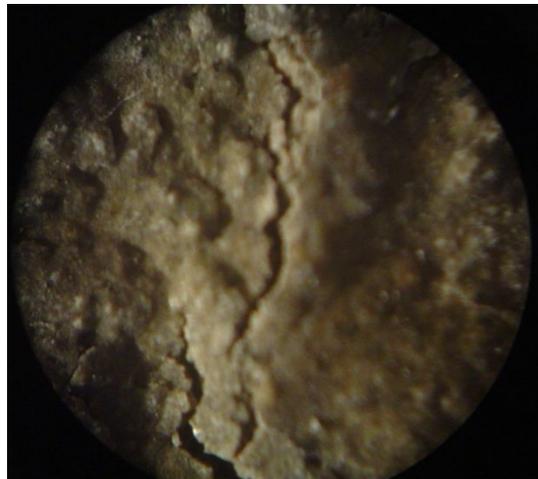
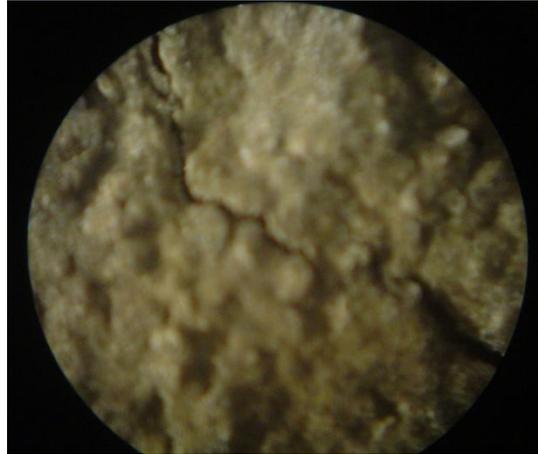
PANEL: CRF-900



FISURA #	LONGITUD (cm)	ESPEJOR (mm)	PESO	POTENCIAL DE FISURACIÓN	%
1	3.00	0.05	1	3.0	6
2	3.00	0.05	1	3.0	6
3	3.70	0.15	3	11.1	23
4	5.00	0.15	3	15.0	31
5	4.80	0.10	2	9.6	20
6	3.40	0.10	2	6.8	14
			TOTAL	49	100

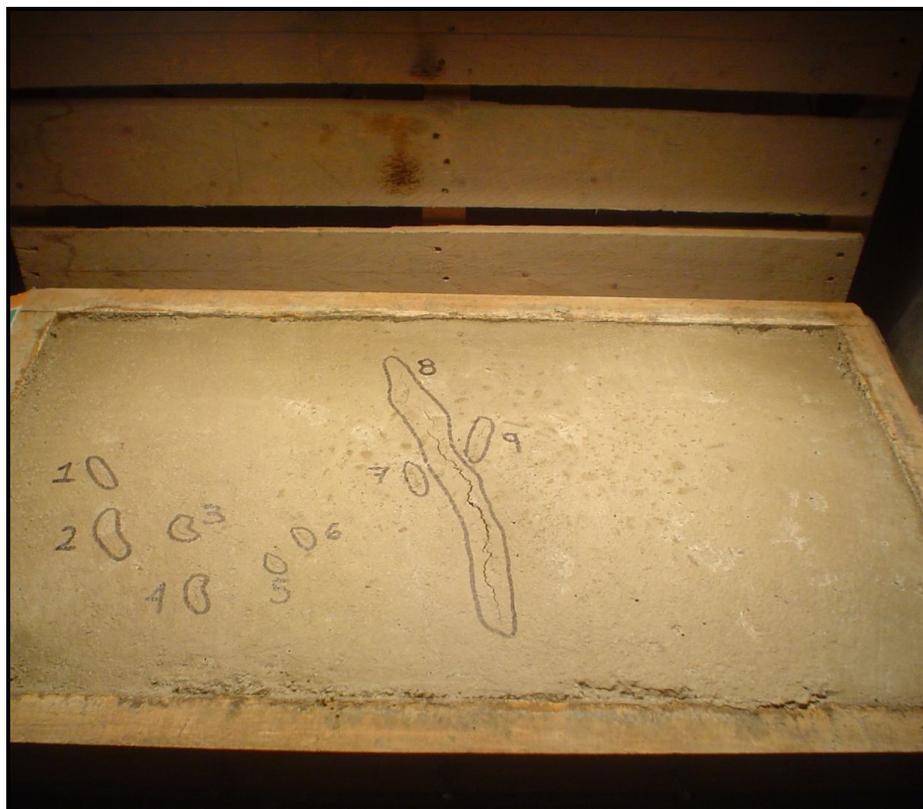






ANEXO 7

PANEL: CRP-300

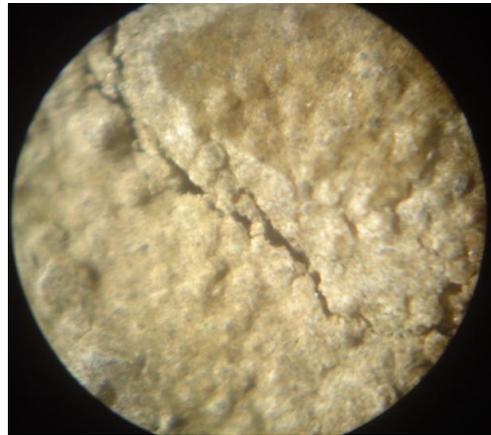


FISURA #	LONGITUD (cm)	ESPESOR (mm)	PESO	POTENCIAL DE FISURACIÓN	%
1	3.50	0.05	1	3.5	1
2	4.30	0.05	1	4.3	1
3	3.90	0.10	2	7.8	2
4	2.70	0.10	2	5.4	1
5	0.90	0.05	1	0.9	0
6	1.30	0.05	1	1.3	0
7	2.70	0.05	1	2.7	1
8	36.80	0.50	10	368.0	91
9	4.20	0.15	3	12.6	3
TOTAL				407	100

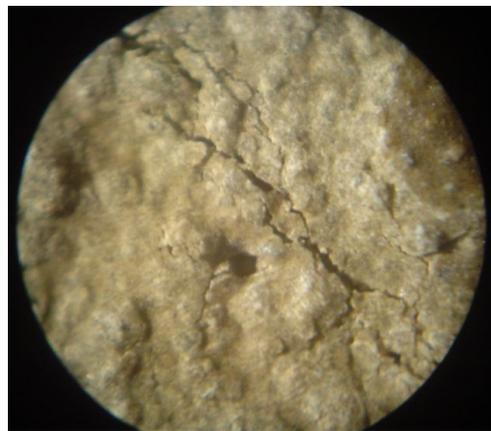


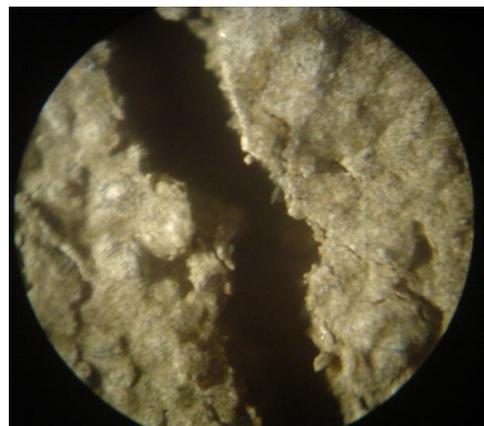
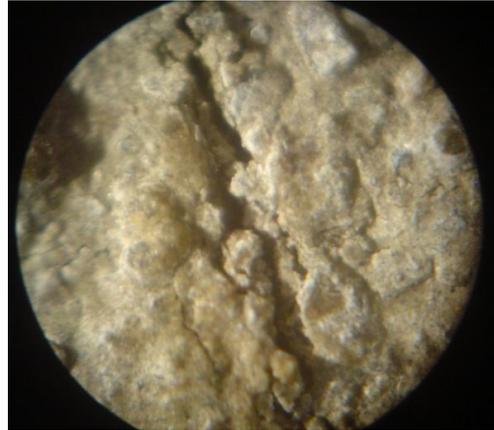


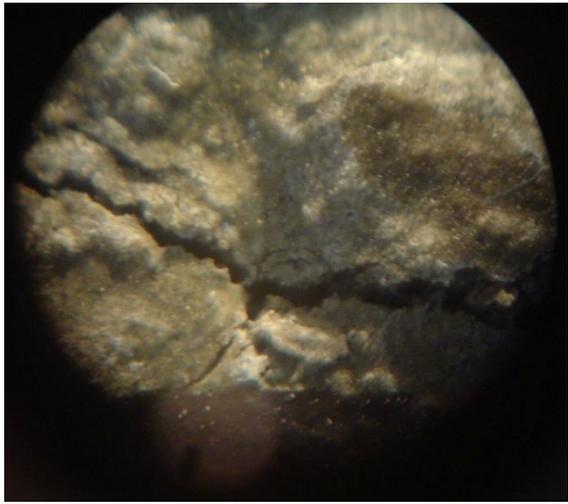
050



06

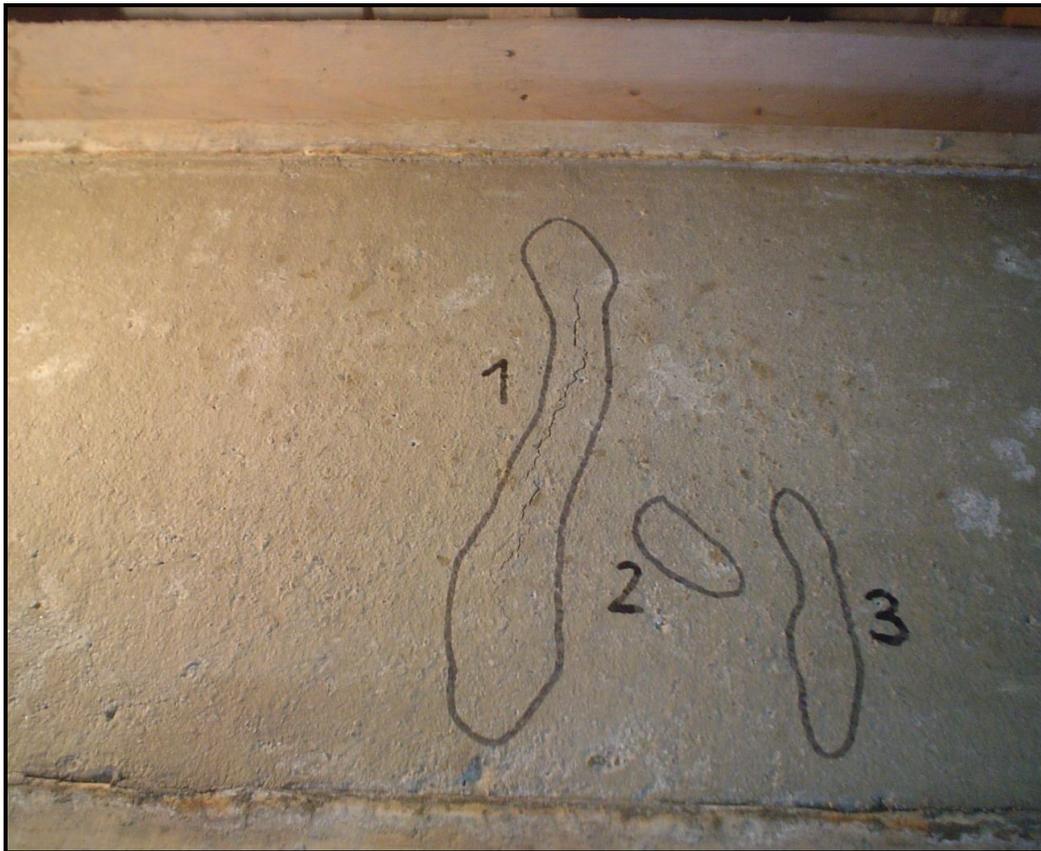




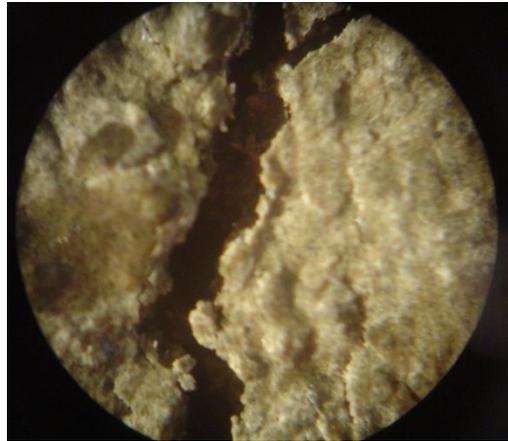


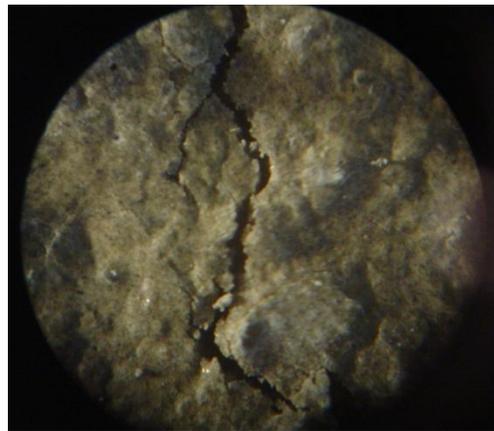
ANEXO 8

PANEL: CRP-500



FISURA #	LONGITUD (cm)	ESPEJOR (mm)	PESO	POTENCIAL DE FISURACIÓN	%
1	31.60	0.45	9	284.4	95
2	6.20	0.05	1	6.2	2
3	7.30	0.05	1	7.3	2
TOTAL				298	100



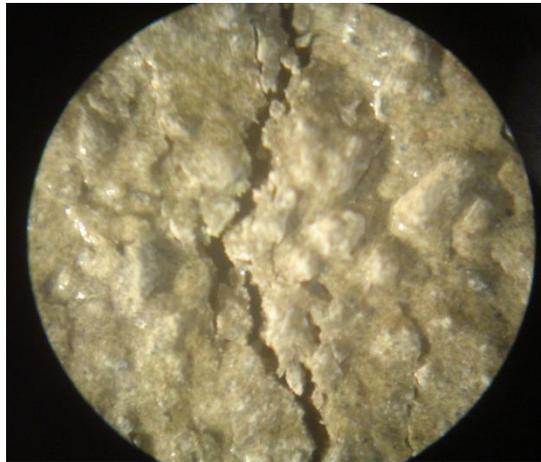
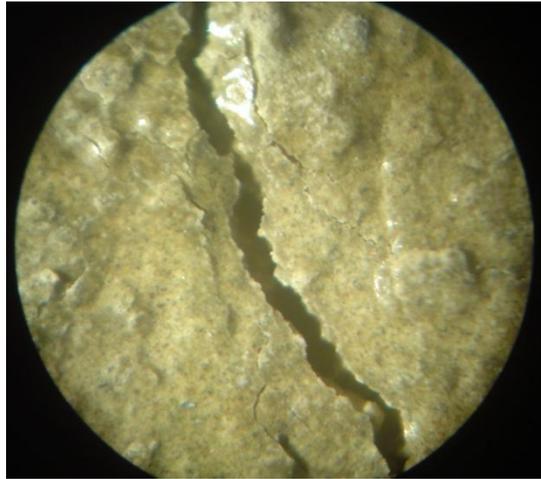


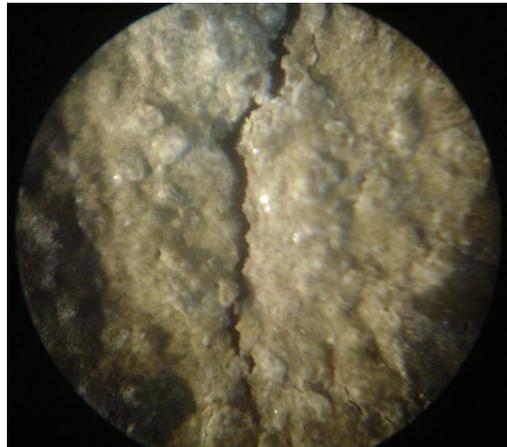
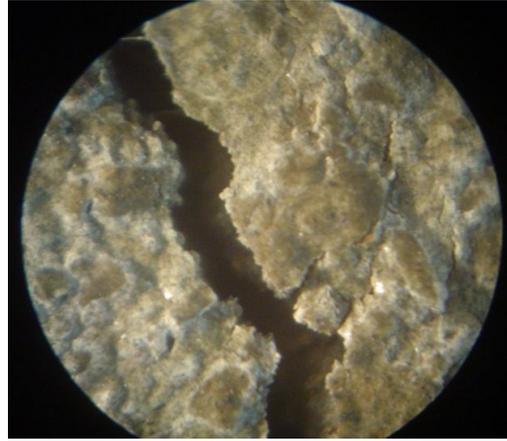
ANEXO 9

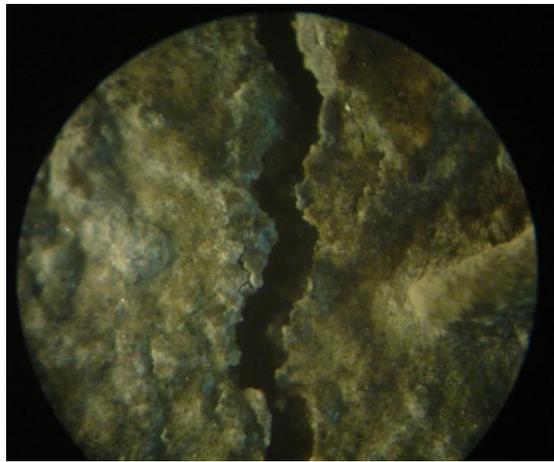
PANEL: CRP-900



FISURA #	LONGITUD (cm)	ESPEJOR (mm)	PESO	POTENCIAL DE FISURACIÓN	%
1	1.30	0.25	5	6.5	3
2	3.40	0.15	3	10.2	5
3	18.40	0.35	7	128.8	62
4	3.80	0.10	2	7.6	4
5	9.00	0.30	6	54	26
TOTAL				207	100







BIBLIOGRAFÍA

- 1. Título:** Tópicos de tecnología del concreto
Autor: Enrique Pasquel Carbajal
Lugar de publicación: Lima, Perú 1992-1993

- 2. Título:** Fisuras de retracción plástica
Autor: Edgardo Becker
Lugar de publicación: Argentina

- 3. Título:** Retracción del concreto
Autor: Germán Hermida
Lugar de publicación: Colombia

- 4. Título:** Concreto reforzado con fibras
Autor: Instituto mexicano del cemento y del
concreto
Lugar de publicación: México, 2007

5. **Título:** Cracks in concrete
Autor: Joe E. Kelly
Lugar de publicación: Usa, 1981
6. **Título:** A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete
Autor: Paul P. Kraai
Lugar de publicación: Usa, 1985
7. **Título:** The concrete cracking syndrome
Autor: L. Boyd Mercer
Lugar de publicación: Australia, 1975
8. **Título:** Control of cracking in concrete structures
Autor: ACI Committee 224
Lugar de publicación: USA
9. **Título:** Standard specification for concrete aggregates
Autor: ASTM C33
Lugar de publicación: USA, 2003

10. **Título:** Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method
- Autor:** ASTM C231
- Lugar de publicación:** USA, 2004
11. **Título:** Standard test method for slump of hydraulic cement concrete
- Autor:** ASTM C 143
- Lugar de publicación:** USA, 2005
12. **Título:** Standard test method for density (unit weight), yield and air content (gravimetric) of concrete
- Autor:** ASTM C 138
- Lugar de publicación:** USA, 2001
13. **Título:** Standard test method for compressive strength of cylindrical specimens
- Autor:** ASTM C 39
- Lugar de publicación:** USA, 2004

14. Título: Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third point loading)

Autor: ASTM C 496

Lugar de publicación: USA, 2002