

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

El hormigón es un material de construcción excelente, posiblemente sea el más usado y difundido a nivel mundial, pero tiene un “talón de Aquiles” al igual que sucede con todos los materiales compuestos de cemento, es relativamente frágil e inherentemente débil para resistir esfuerzos de tracción, por lo que se fisurará con niveles bajos de deformación por tracción.

En estructuras superficiales a medida que el hormigón fragua desde su vertido, el agua de la parte superior se evapora, el hormigón en esa zona se encoge, mientras que la parte inferior mantiene su humedad y no sufre cambios de volumen, por lo que se desarrollan deformaciones diferenciales que inducen esfuerzos de tracción en el hormigón, en una etapa en la que aún no ha alcanzado la suficiente resistencia a tracción para soportarlos, por lo tanto esta superficie se fisura, esto ocurre en las primeras horas de fraguado del hormigón y en general se presenta en condiciones ambientales extremas, como altas temperaturas, bajas humedades relativas y altas velocidades de viento.

Las fisuras pueden aumentar de tamaño con el tiempo, reduciendo la vida útil de este tipo de estructuras, este fenómeno muy común en el campo de la construcción suele denominarse fisuración por retracción plástica, durante las últimas décadas grandes esfuerzos y adelantos tecnológicos se han llevado a cabo para comprender este fenómeno, las consecuencias que ocasiona y la manera de prevenir su desarrollo.

Algunas investigaciones desarrolladas en países industrializados se han centrado en el uso de fibras para reducir el número y tamaño de estas fisuras con resultados muy satisfactorios, la adición de una cantidad de fibras relativamente pequeña ayuda a reducir el número y tamaño de estas fisuras. Como resultado se ha creado una industria totalmente nueva, el hormigón reforzado con fibras (HRF), y el uso de productos de HRF ha aumentado con rapidez.

En el cuadro 1 se muestra los resultados obtenidos en paneles de hormigón reforzado con fibras, elaborado por el personal a cargo de la norma ASTM C1579 sobre retracción plástica, se observa los buenos resultados obtenidos, por ello se ve la necesidad de seguir investigando sobre el tema con materiales regionales, para conseguir estos beneficios en nuestras estructuras superficiales.

Cuadro 1 Anchos de fisuras en muestras de hormigón reforzado con fibras

Identificación de mezcla	Volumen de fibra	Número de paneles	Ancho de fisura promedio (mm)	Desviación estándar de ancho de fisura promedio (mm)
A	0% de fibra	6	0.67	0.04
B	0.05% de fibra	4	0.44	0.05
C	0.10% de fibra	4	0.33	0.05
D	0.15% de fibra	4	0.08	0.04
E	0.20% de fibra	2	0.03	0.02

Fuente: Norma ASTM C1579

1.2 Descripción del problema.

En el hormigón las fisuras por retracción plástica por lo general no son dañinas cuando tienen poca profundidad, causando solo pérdida de confort y estética, pero cuando tienen gran profundidad, pueden ocasionar corrosión de armaduras, pérdida de resistencia, mayor permeabilidad, menor durabilidad de las estructuras y pérdidas económicas por futuras reparaciones. Por lo tanto, es importante controlar, evaluar y evitar la aparición de estas fisuras para lograr estructuras más durables que aseguren un ciclo de servicio aceptable con el menor costo de mantenimiento posible.

El hormigón protege a las armaduras contra la corrosión, si el hormigón se fisura y por una circunstancia cualquiera como la penetración de agua o disoluciones ácidas la alcalinidad disminuye, la protección al acero puede perderse. Los productos que se forman a causa de la corrosión de armaduras son de carácter expansivo, desarrollando grandes presiones que provocan la fisuración del hormigón en lugares cercanos a las armaduras, además abren nuevos cauces por donde pudieran ingresar agentes agresivos.

Figura 1 Fisuras causadas por retracción plástica



a) Fisuras en losa reticular



b) Fisuras en losa alivianada con viguetas pretensadas



c) Cielo raso dañado por fisuras

Fuente: Elaboración propia

Para evitar la corrosión de las armaduras los hormigones deben ser muy homogéneos, compactos, impermeables y sobre todo NO TENER FISURAS, de esta manera se protege tanto a las armaduras como al hormigón de agentes agresivos, las medidas adoptadas para evitar o reducir al mínimo el deterioro de las estructuras de hormigón deben ser oportunas, eficaces y económicas.

Las fisuras por retracción plástica una vez que el hormigón empieza su etapa de endurecimiento son muy difíciles de tapar, ya sea con lechada de cemento remedio más aparente que eficaz, o con resinas epóxicas buen remedio pero caro y laborioso, ninguno de los tratamientos mencionados consigue superar el efecto negativo en la apariencia del hormigón quitándole confort, por ello es imprescindible anticiparse a la aparición de estas fisuras tomando medidas preventivas.

Las estructuras fisuradas no suponen ningún inconveniente para su normal utilización, siempre que se limite las aberturas de las fisuras a valores adecuados compatibles con las exigencias de durabilidad (corrosión de armaduras) y aspecto externo (confort).

De acuerdo a la Norma Boliviana del Hormigón Armado, la máxima abertura característica aceptable de fisura para las estructuras, se define en función a las condiciones del ambiente y de la sensibilidad de las armaduras a la corrosión. Para un recubrimiento igual al recubrimiento mínimo, los valores recomendados para la máxima abertura característica de fisura, que deberá aceptarse para satisfacer las exigencias de durabilidad, será la que se indica en el siguiente cuadro:

Cuadro 2 Máxima abertura característica aceptable de fisura

Condiciones del ambiente	Sensibilidad de las armaduras a la corrosión	
	Muy sensibles	Poco sensibles
No severas	≤ 0.2 mm	≤ 0.4 mm
Moderadamente severas	≤ 0.1 mm	≤ 0.2 mm
Severas	≤ 0.1 mm	≤ 0.2 mm ó ≤ 0.1 mm

Fuente: Norma Boliviana del Hormigón Armado

Los valores de estas aberturas corresponden a las fisuras medidas en las zonas de recubrimiento, fuera de estas zonas se puede aceptar fisuras de mayor abertura si no hay exigencias de aspecto externo.

Considerando el caso más extremo de abertura de fisura, para condiciones severas y armaduras muy sensibles a la corrosión que pudieran deteriorar a las estructuras de hormigón, se tiene que la máxima abertura característica aceptable de fisura sería 0.1 milímetros. Las aberturas de las fisuras por retracción plástica por lo general en un inicio oscilan entre 0.2 a 0.4 milímetros en la superficie del hormigón, incrementando sus aberturas y profundidades con el paso del tiempo, siendo estas aberturas mayores a la permitida por la Norma Boliviana del Hormigón Armado, para satisfacer las exigencias de durabilidad se debe reducir las aberturas de las fisuras a valores aceptables y en lo posible eliminar completamente este tipo de fisuras.

1.3 Objetivos.

1.3.1 General.

Comparar cuantitativamente fibras Acrílicas versus fibras de Caraguata, como inhibidores de fisuras causadas por el fenómeno de la retracción plástica en muestras de hormigón ($f'_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$), para determinar la mejor alternativa de hormigón reforzado con fibras en estructuras superficiales.

1.3.2 Específicos.

- Determinar el comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibras Acrílicas y fibras de Caraguata.
- Describir los principales factores que ocasionan fisuras en estructuras superficiales de hormigón, debido al fenómeno de la retracción plástica.
- Determinar las características de las fibras de Caraguata para ser usadas como refuerzo del hormigón.
- Identificar los procesos y procedimientos de obtención de las fibras de Caraguata, para la elaboración de un hormigón reforzado con estas fibras.

- Describir el campo de aplicación del hormigón reforzado con fibras, ya sean sintéticas o naturales.
- Describir la amplia gama de tipos de fibras que existen actualmente en el mercado.

1.4 Justificación.

Las necesidades de estos tiempos hacen que cada día se necesiten hormigones con mejores características para sobrellevar los diversos problemas a los que nos enfrentamos los ingenieros en el día a día, es por ello que el uso del hormigón reforzado con fibras viene a ser una gran solución para algunos de estos problemas.

Uno de los principales problemas de estructuras superficiales de hormigón son las fisuras causadas por la retracción plástica, este problema puede ser solucionado con la incorporación de fibras dentro de la matriz cementicia, ya que las fibras son las que resistirán estos pequeños esfuerzos de tracción que se generan en el interior del hormigón funcionando como un refuerzo tridimensional, debido a que el hormigón en estado plástico aún no ha desarrollado la suficiente resistencia a la tracción para resistirlos¹, de esta manera las fibras incorporadas en el interior del hormigón evitarán la aparición y propagación de estas fisuras.

1.5 Hipótesis.

Hipótesis de primer grado a contrastar:

- Añadiendo por separado fibras Acrílicas y fibras de Caraguata de 2 centímetros de longitud al hormigón, con diferentes dosificaciones de fibras por volumen de hormigón, se reducirán las fisuras por retracción plástica de la siguiente manera respecto a una muestra patrón sin refuerzo de fibras:
 - Muestras con 0.050% de fibras, reducirán las fisuras en un 25%.
 - Muestras con 0.075% de fibras, reducirán las fisuras en un 50%.
 - Muestras con 0.100% de fibras, reducirán las fisuras en un 75%.

¹ Ref. Bibliográfica 9

Hipótesis de segundo grado a contrastar:

- Añadiendo por separado fibras Acrílicas y fibras de Caraguata de 2 centímetros de longitud al hormigón, con dosificaciones de fibras de 0.050%, 0.075% y 0.100% por volumen de hormigón, su resistencia a compresión no se verá afectada respecto a una muestra patrón sin refuerzo de fibras.

1.6 Alcance y Restricciones.

La investigación desarrollada es de carácter experimental y dirigida solamente a estructuras superficiales, se regirá en el diseño de un hormigón convencional para uso estructural de resistencia $f'_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$. Se adicionará al hormigón por separado fibras Acrílicas y fibras de Caraguata de 2 centímetros de longitud, en las siguientes proporciones 0.050%, 0.075% y 0.100% por volumen de hormigón, para reducir en gran proporción la fisuración del hormigón en estado plástico. También se tendrá una muestra patrón sin adición de fibras que servirá como punto de comparación para los otros tipos de muestras, teniendo en total 7 tipos diferentes de muestras a ensayar.

Los ensayos de retracción plástica se realizarán de acuerdo a la norma ASTM C1579, bajo condiciones atmosféricas controladas, como ser humedad relativa de $30 \pm 10\%$, temperatura ambiente de $36 \pm 3^\circ\text{C}$ y velocidad de viento igual a 4.7 m/s (de ser necesario se puede aumentar este parámetro), manteniendo estos parámetros no habrá variaciones entre los distintos tipos de muestras.

Se realizaran análisis comparativos, acerca de la cuantificación de fisuras en el hormigón reforzado con los dos tipos de fibras por separado, y entre los distintos porcentajes de fibras empleados, los análisis se harán mediante gráficos comparativos que ayuden a interpretar el desempeño de ambos tipos de fibras.

También se realizarán ensayos para medir la resistencia a compresión de hormigones reforzados con ambos tipos de fibra por separado, en las mismas proporciones de fibras utilizadas en el ensayo de retracción plástica, y se comparará con un hormigón patrón sin refuerzo de fibras, con rotura de probetas a los 7, 14 y 28 días de edad del hormigón, para evaluar el efecto de adicionar estos tipos de fibras en el interior del hormigón.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fisuras en el hormigón.

La mayoría de las estructuras de hormigón en algún momento de su vida útil presentan fisuras, cuyas causas van desde variaciones en la composición del material, hasta la acción de las cargas, una fisura pone en duda la capacidad del hormigón, a resistir los esfuerzos a los que está sometido. La existencia de fisuras supone un riesgo psicológico, pues el usuario de dicha estructura identificará en ella un supuesto riesgo, ante tal circunstancia el usuario reaccionará no haciendo uso de dicha estructura, por tanto ésta quedará fuera de servicio.

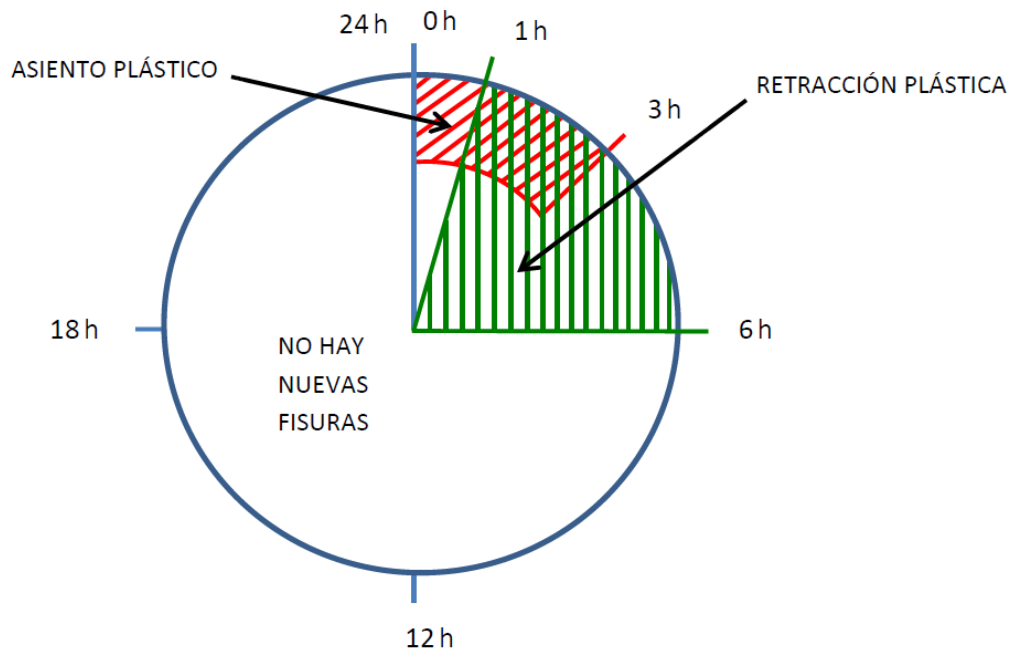
Durante muchos años, la tendencia del hormigón a fisurarse ha sido aceptada como un hecho natural, siendo un mal con el que hemos aprendido a convivir, así lo demuestran aquellas estructuras donde controlamos la fisura anticipándonos a ella, colocando juntas. Por supuesto en la medida en que una estructura de hormigón no se fisure, mejor en cuanto a su durabilidad, la transmisión de cargas y la no concentración de esfuerzos. En algunos casos simplemente no se permite fisuramiento alguno, en la mayoría de estas circunstancias por consideraciones funcionales o estéticas.

Hay solamente una razón por la que las fisuras ocurren en el hormigón, y ésta es que existen esfuerzos que exceden la resistencia última del hormigón en un momento específico. Es por ello que se deben tomar medidas, ya sea en estado plástico o endurecido, para mantener estas fisuras por debajo de aquellos límites que supongan un riesgo para la durabilidad de los elementos estructurales.

2.1.1 Fisuras en el primer día del hormigón.

En el primer día del hormigón pueden ocurrir dos tipos de fisuras: asiento plástico y retracción plástica. En la figura 2 se indica la posible ocurrencia de fisuras en el hormigón, durante el primer día de edad.

Figura 2 Fisuras en el primer día del hormigón



Fuente: Construcciones II (Texto guía), UAJMS, Ing. David Zenteno Benítez

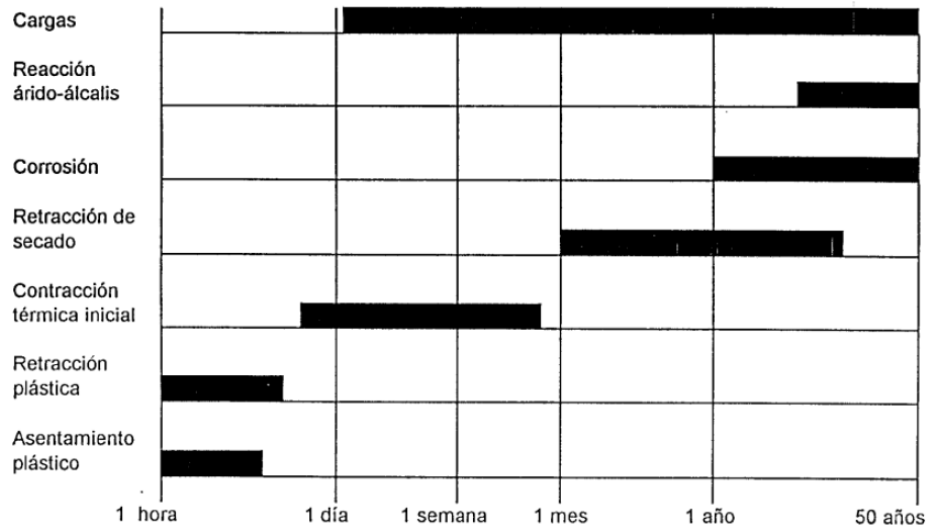
Se observa que el periodo crítico de aparición de fisuras son las seis primeras horas, por lo que es importante cuidar en ese plazo el hormigón, tomar las precauciones necesarias para evitar estas fisuras, además es recomendable registrar las fisuras a medida que van apareciendo, pues si su existencia se registra más adelante, éstas pueden ser atribuidas, erróneamente, a otras causas.

También se observa que después de las 6 horas no se generan nuevas fisuras, debido a que el hormigón después de ese tiempo ha terminado su fraguado y empieza su etapa de endurecimiento, pero en el tiempo restante hasta completar las 24 horas estas fisuras tienden a estabilizarse pudiendo hacerse más profundas, más anchas e inclusive más largas.

2.1.2 Fisuras durante la vida del hormigón.

El hormigón durante su vida en servicio, presenta diferentes tipos de fisuras, atribuibles a diferentes causas, a continuación se muestra la figura 3 a manera de resumen, donde se aprecia el orden cronológico en el que aparecen.

Figura 3 Clasificación de las fisuras durante la vida del hormigón



Fuente: Pablo Pujadas Álvarez, Tesina

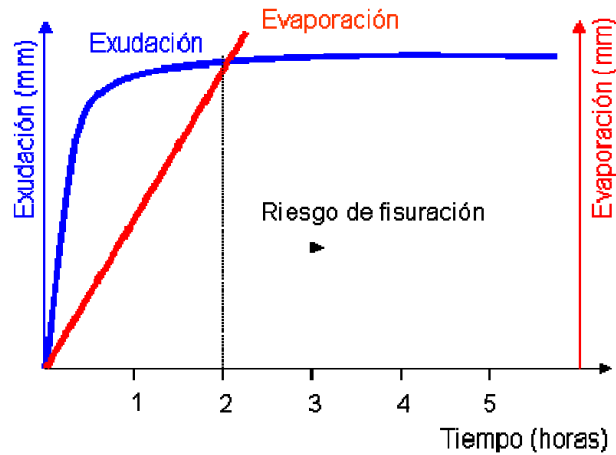
2.2 El fenómeno de la retracción plástica.

2.2.1 Fisuras por retracción plástica.

La retracción plástica es un fenómeno motivado por la evaporación y pérdida del agua de constitución del hormigón, el fenómeno tiene una duración de 24 horas después de la elaboración del hormigón, teniendo un mayor desarrollo desde la primera hasta la sexta hora, momento en el que finaliza el fraguado del hormigón; tiene una primordial importancia en este fenómeno la velocidad de evaporación del agua de la superficie del hormigón expuesta al exterior, velocidad que depende del poder desecante de los vientos que barren estas superficies, la humedad relativa del aire y la temperatura ambiente.

Si la evaporación del agua en la superficie del hormigón excede de la cantidad aportada por la exudación (ver figura 4) esta superficie se seca tratando de retraerse, entonces la disminución de volumen de esta masa de hormigón se ve restringida por la masa húmeda inferior que mantiene su volumen, por lo tanto se desarrollan esfuerzos de tracción en el hormigón en lugares cercanos a la superficie, en una etapa en la que aún no ha desarrollado la suficiente resistencia a la tracción para soportarlos, por lo cual esta superficie se fisura.

Figura 4 Relación Exudación – Evaporación

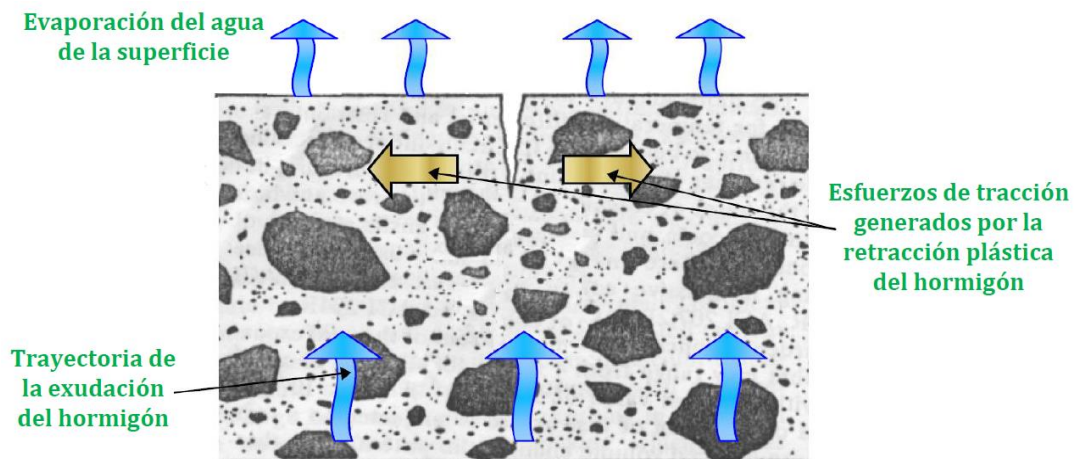


Fuente: Grupo Polpaico, Informe técnico

A continuación se describe el mecanismo de fisuración por retracción plástica²:

1. El agua de exudación aparece en la superficie.
2. La evaporación del agua, es mayor que la velocidad del agua de exudación.
3. La superficie del hormigón se seca y trata de retraerse.
4. El hormigón húmedo restringe la retracción.
5. Se generan esfuerzos de tracción en el hormigón plástico.
6. Se forma la fisura por retracción plástica.

Figura 5 Mecanismo de fisuración por retracción plástica



Fuente: Marlon Orlando Cárcamo Reyes, Ing. Civil

² Ref. Bibliográfica 9

Las fisuras por retracción plástica generalmente se dan en estructuras donde la relación superficie-expuesta/volumen es alta, las fisuras varían en longitud desde tan solo 2.5 cm hasta 2 m; suelen ser superficiales tienen una profundidad de 2 a 3 cm, pudiendo inclusive llegar hasta 5 cm (también es habitual que lleguen a atravesar todo el espesor de la pieza cuando es delgada); con anchos en la superficie de 0.2 a 0.4 mm, pero bajo condiciones atmosféricas extremas llegan a medir hasta 3 mm y van decreciendo conforme van profundizando en la pieza.

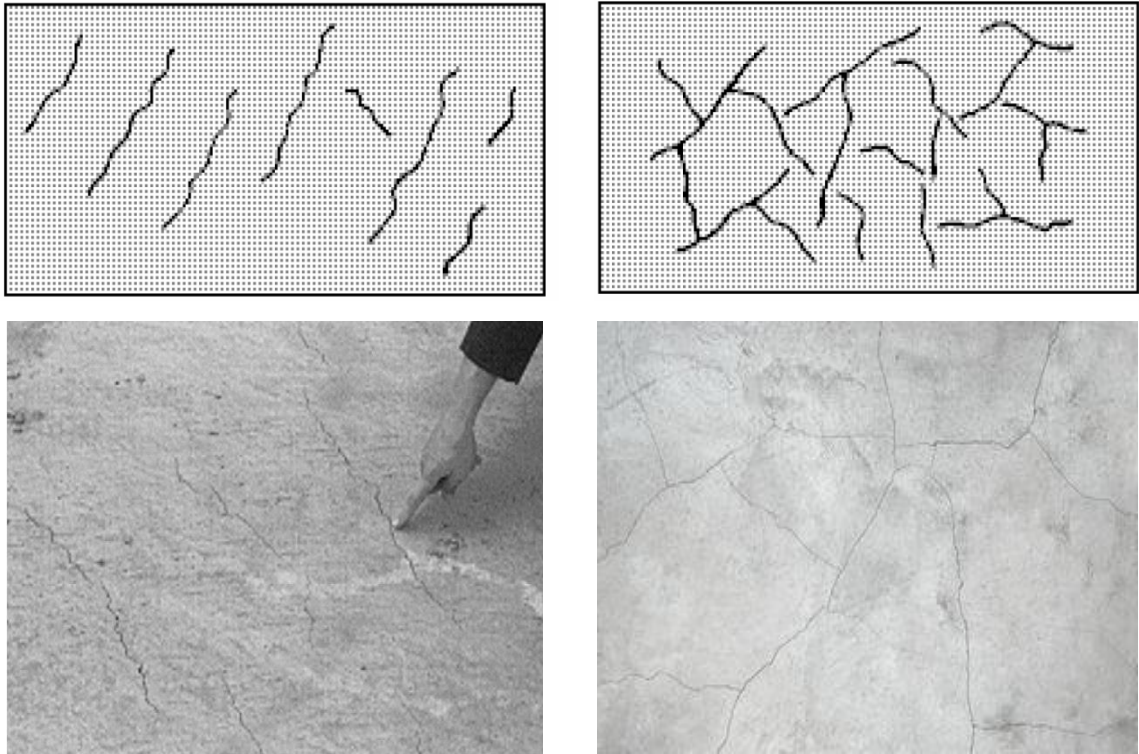
La aparición de estas fisuras son más frecuentes en tiempo seco, soleado y sobretodo con viento aunque las temperaturas no sean altas; pueden aparecer también en tiempo húmedo si existe viento; e incluso en tiempo frío, cuando la temperatura del hormigón es mucho mayor que la temperatura ambiente (bajo tales circunstancias la temperatura de una capa de aire situada inmediatamente arriba de la losa aumentará, por tanto, su humedad relativa se reducirá y aparecerán fisuras). De ahí la conveniencia de colocar el hormigón lo más frío posible en tiempo caluroso, y de no sobrecalentarlo en tiempo frío.

2.2.2 Formas que adoptan las fisuras por retracción plástica.

Este tipo de fisuras son muy frecuentes en las losas de hormigón y pueden mostrarse, por lo general, de las siguientes maneras:

- Pueden seguir líneas paralelas diagonales, aproximadamente a 45° con las esquinas, con distancias comprendidas entre ellas de 20 centímetros a 1 metro, generalmente son ocasionadas y siguen la misma dirección del viento, ver a) de figura 6.
- Pueden presentarse a modo de crestas onduladas, o siguiendo un patrón indeterminado formando generalmente una especie de malla, ocasionadas por condiciones de alta evaporación, ver b) de figura 6.
- Pueden seguir el recorrido de alguna cualidad física de la pieza, por ejemplo si el elemento es de espesor variable las fisuras se localizan en las zonas más delgadas, es el caso de forjados, ver a) de figura 7. Si el elemento es de espesor uniforme, las fisuras suelen distribuirse caprichosamente, ver b) de figura 7.

Figura 6 Formas que adoptan las fisuras por retracción plástica

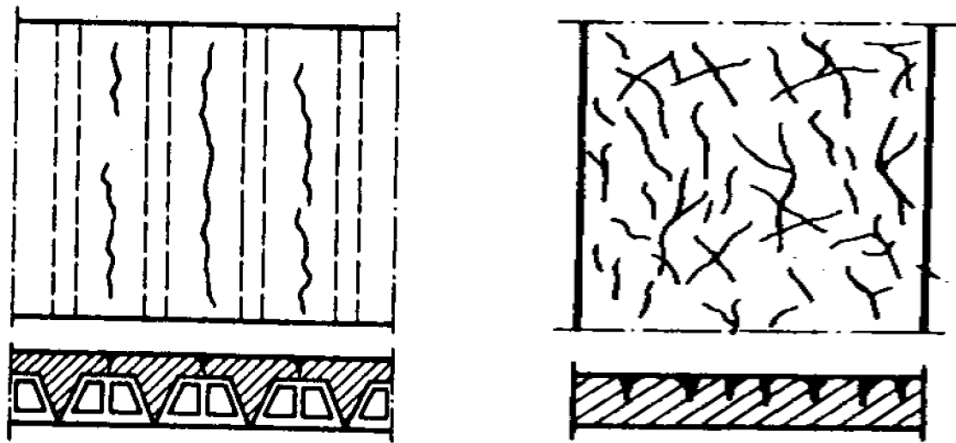


a) Fisuras paralelas

b) Fisuras con patrón indeterminado

Fuente: Grupo Polpaico, Informe técnico

Figura 7 Fisuras por retracción plástica en elementos de espesor variable



a) Fisuras en la zona de menor espesor

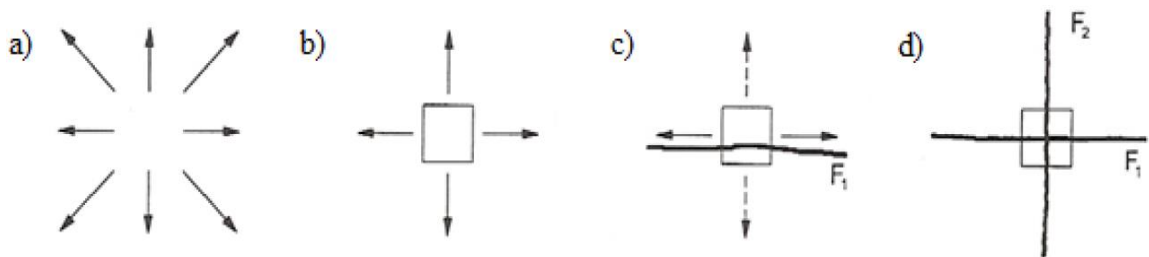
b) Fisuras con patrón indeterminado

Fuente: Pedro Jiménez Montoya, Ing. Civil

Para el tipo de fisuración aleatoria donde se distribuyen siguiendo un patrón indeterminado, las fisuras vienen a cortarse casi siempre con ángulos aproximadamente rectos; ello se debe a que antes de aparecer una fisura, la superficie del hormigón se encuentra sometida a equitracciones; al surgir la fisura, la tracción que le es normal queda anulada, pero se mantiene la que le es paralela, la cual puede generar una nueva fisura perpendicular a la anterior³.

En la figura 8 se observa un esquema de fisuración por retracción plástica, en a) se muestra una superficie sometida a equitracciones, en b) se muestra un elemento virtual sometido a dos esfuerzos principales, en c) se muestra como en la dirección vertical se alcanza la resistencia a tracción, surge una fisura F_1 y la fuerza vertical desaparece, en d) se muestra como la fuerza horizontal permanece y es igual a la vertical, lo probable es que pronto surja la fisura F_2 .

Figura 8 *Esquema de fisuración aleatoria por retracción plástica*

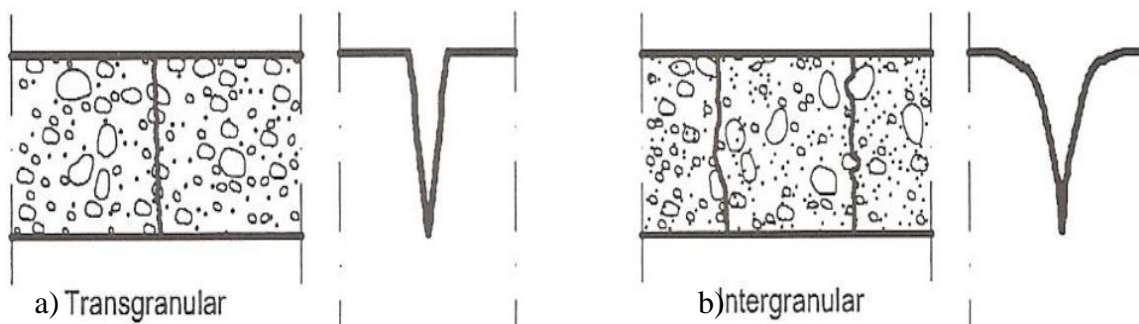


Fuente: Pablo Pujadas Álvarez, Tesina

Las fisuras por retracción plástica no tienen un aspecto de rotura limpia, como corresponde a las que se forman después que el hormigón ha endurecido. Estas últimas presentan bordes agudos y bien definidos, atravesando generalmente a los agregados (fisura transgranular), mientras que en las fisuras por retracción plástica, no se ha desarrollado totalmente la adherencia árido-pasta, por lo que nunca atraviesan los agregados, sino que los rodean (fisura intergranular) y presentan labios borrosos y poco definidos, como se aprecia en la figura 9.

³ Ref. Bibliográfica 10

Figura 9 Formas en que fisuras atraviesan una pieza



Fuente: Pablo Pujadas Álvarez, Tesina

2.2.3 Factores que intervienen en la retracción plástica.

Para la evaluación de la retracción plástica han de tenerse en cuenta los diversos factores que influyen en el fenómeno, a continuación se presenta la influencia de los factores más importantes.

2.2.3.1 Factores internos.

Son factores que dependen de la dosificación de materiales empleados en el hormigón, estos pueden ser modificados de acuerdo a las necesidades deseadas.

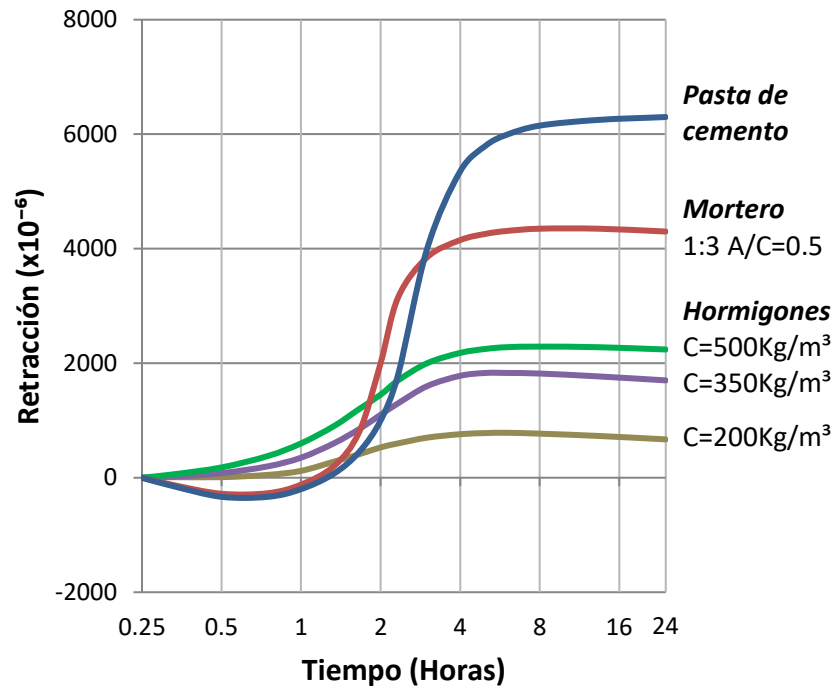
2.2.3.1.1 Contenido y tipo de cemento.

La cantidad de cemento es un factor importante en la retracción, como se puede observar en la figura 10, a mayor dosificación de cemento mayor es el valor de la retracción. En esta figura se observan las retracciones para pasta de cemento, mortero y hormigón; con diferentes contenidos de cemento, conservados a 20 °C, 50% de humedad relativa y velocidad de viento de 3.6 km/h.

Los componentes del cemento también tienen influencia en la retracción del hormigón, por ejemplo los cementos ricos en aluminato tricálcico, presentarán una reacción más fuerte que aquellos que tienen bajo contenido de aluminato tricálcico por tanto mayor retracción. Además el grado de finura del cemento tendrá influencia en la retracción de la pasta, cuanto más finamente molido se encuentre un cemento, mayor será el número de partículas que existan en él por unidad de peso, en consecuencia

mayor será también la retracción experimentada por la pasta pura de cemento. Las propiedades del cemento tienen una pequeña influencia en la retracción del hormigón, por lo que una alta retracción de la pasta de cemento puro, no necesariamente significa una alta retracción en el hormigón fabricado con dicho cemento⁴.

Figura 10 Influencia del contenido de cemento en la retracción



Fuente: Fernández Cánovas, 2007

2.2.3.1.2 Contenido y tipo de áridos.

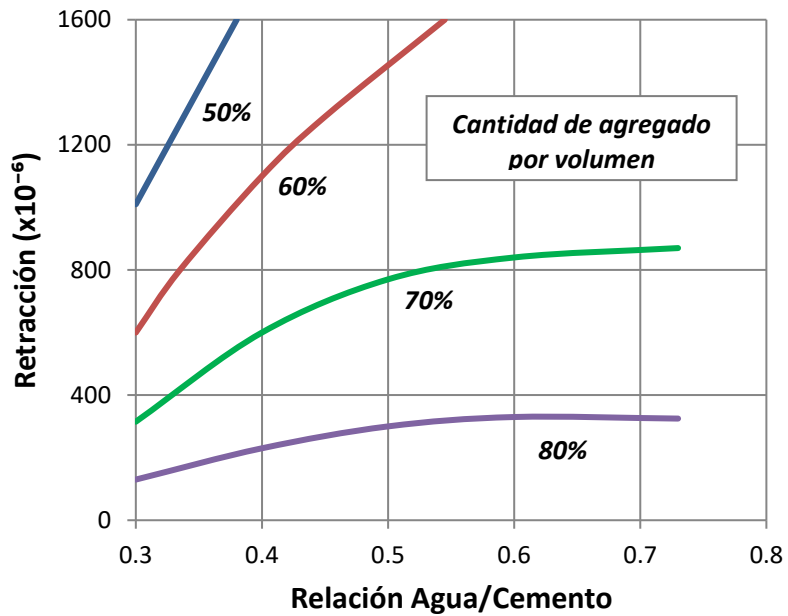
El hormigón en condiciones normales, contiene entre el 50% a 80% en volumen de áridos, si estos tienen menos capacidad de retraerse que la pasta de cemento, limitarán la retracción del conjunto. El tamaño máximo del árido influye en la retracción, ya que a mayor volumen de árido menor volumen de pasta, lo que se traduce en menor retracción⁵. La naturaleza de los áridos también es un factor influyente, por ejemplo, los hormigones con áridos ligeros presentan mayor retracción, pues el agregado tiene menor módulo de elasticidad por lo tanto es más deformable y ofrecerá menor resistencia a la

⁴ Neville, 2011

⁵ Garcia Madrid & Horstman Largacha, 1985

retracción de la pasta⁶. La influencia del contenido de árido, combinada con la relación a/c se presenta en la figura 11, en ésta se observa como para una misma relación a/c, la retracción aumenta a medida que la cantidad de árido disminuye.

Figura 11 Influencia del contenido de árido en la retracción



Fuente: Neville, 2011

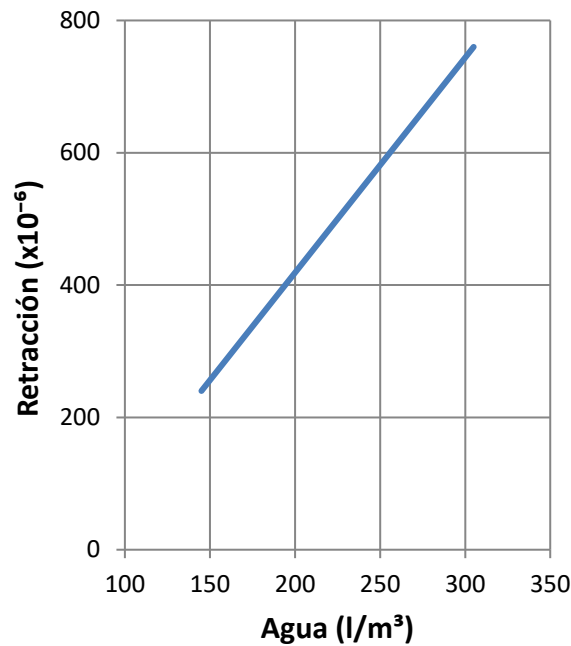
2.2.3.1.3 Relación a/c.

Si se tiene igualdad de dosis de cemento por m³, la retracción aumentará con la relación a/c, habrá mayor cantidad de agua de amasado, que no interviene en la hidratación del cemento, la cual deberá ser eliminada produciendo mayor retracción⁷. La cantidad de agua influye mucho en la retracción, ya que reduce el volumen de áridos introducidos en el hormigón, que son los que realmente frenan la retracción. En la figura 12 se presenta como a partir de la cantidad de agua de una mezcla puede tenerse una idea de la magnitud de la retracción que se puede esperar.

⁶ Neville, 2011

⁷ Garcia Madrid & Horstman Largacha, 1985

Figura 12 Influencia del agua de amasado en la retracción



Fuente: Fernández Cánovas, 2007

2.2.3.2 Factores externos.

Son factores que dependen generalmente de las condiciones medioambientales, sobre las cuales no es fácil intervenir a excepción del curado del hormigón.

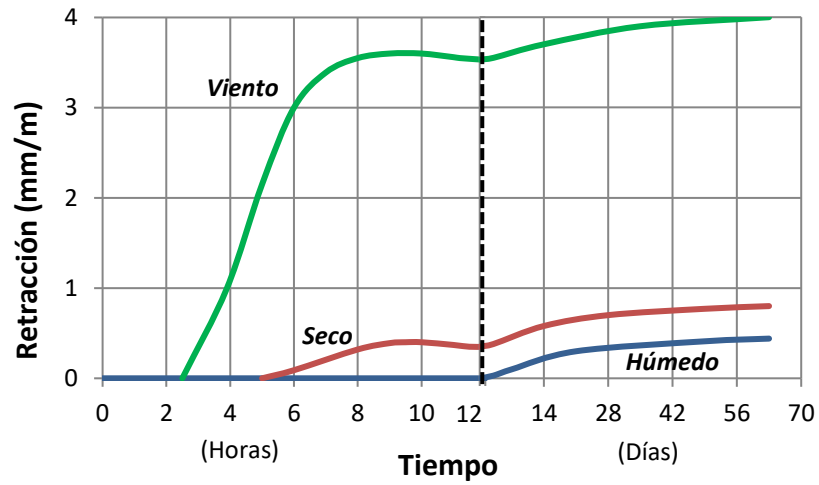
2.2.3.2.1 Temperatura ambiente.

Si bien la temperatura ambiente no es el principal factor que ocasiona las fisuras por retracción plástica, es el factor más frecuente en la mayoría de los casos. La temperatura está directamente relacionada con la velocidad de evaporación del agua en la superficie de hormigón, siendo ésta mayor a elevadas temperaturas. Se debe tener en cuenta que no es conveniente hormigonar cuando la temperatura ambiente es mayor a 40 °C.

2.2.3.2.2 Velocidad del viento.

El viento es el factor determinante en la velocidad de evaporación del agua en la superficie del hormigón, debido al gran poder desecante que tiene. La figura 13 muestra como la retracción del hormigón es mucho mayor, cuando se encuentra en un ambiente que está afectada por el viento.

Figura 13 Retracción en diferentes tipos de ambientes

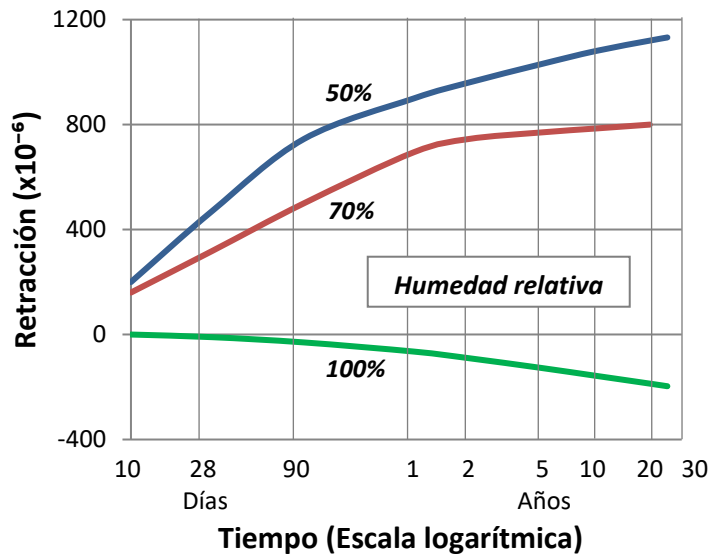


Fuente: Holt y Leivo, 2000

2.2.3.2.3 Humedad relativa.

Al aumentar la humedad relativa del ambiente la retracción disminuye, ya que esta ayuda a mantener el agua retenida en los poros por más tiempo, evitando que se creen esfuerzos durante la etapa de fraguado. En la figura 14 se observa como para una humedad relativa creciente la retracción disminuye, y para una humedad de 100%, el hormigón no se retrae, si no que aumenta sus dimensiones.

Figura 14 Retracción a diferentes humedades relativas

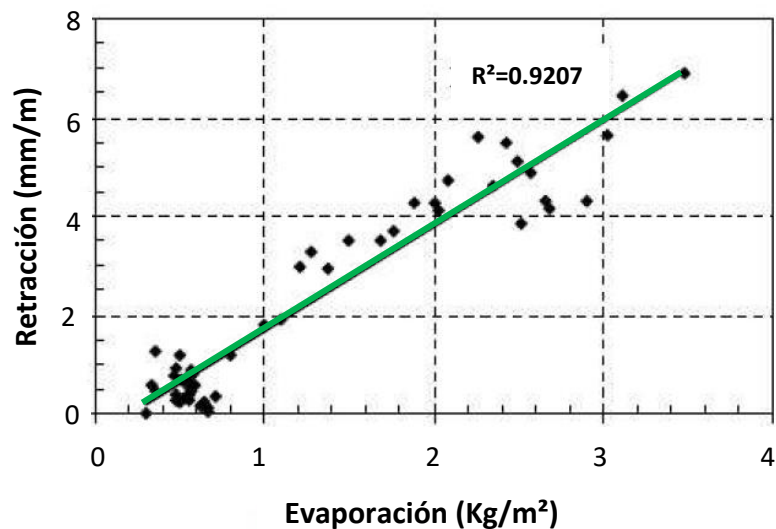


Fuente: Neville, 2011

2.2.3.2.4 Evaporación del agua en la superficie del hormigón.

La evaporación del agua en la superficie del hormigón, es el parámetro que determina si éste se fisura o no y es consecuencia de los 3 factores anteriores: temperatura, viento y humedad relativa, se considera que si la velocidad de evaporación del agua en el hormigón es superior a 1 kg/m²/h existe un alto riesgo de que el hormigón empiece a fisurarse. La relación que existe entre la evaporación del agua y la retracción es proporcional, ya que a mayor evaporación se tendrá mayor retracción, así lo demuestra la figura 15.

Figura 15 Retracción a diferentes tasas de evaporación



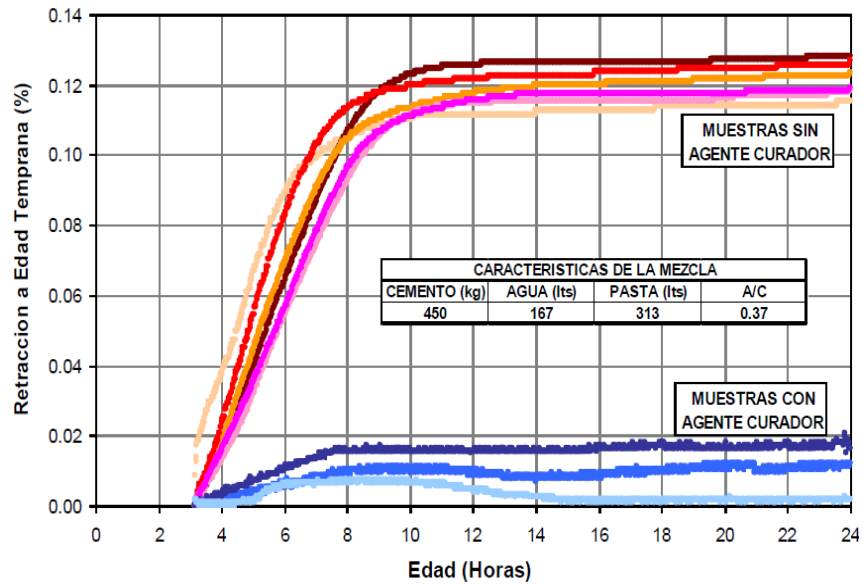
Fuente: Holt y Leivo, 2000

2.2.3.2.5 Curado del hormigón.

Los curados húmedos y prolongados son beneficiosos para el hormigón ya que dan lugar a una mayor hidratación del cemento con una gran formación de geles. Por tanto al tener menos partículas que coarten la retracción, la pasta se hará más resistente con la edad y soportara mejor los esfuerzos generados por la retracción sin llegar a fisurarse⁸. En la figura 16 se muestra las mejoras que se puede lograr, usando agentes curadores o de igual manera dándole un correcto curado al hormigón.

⁸ Fernández Cánovas, 2007

Figura 16 Influencia del curado sobre la retracción



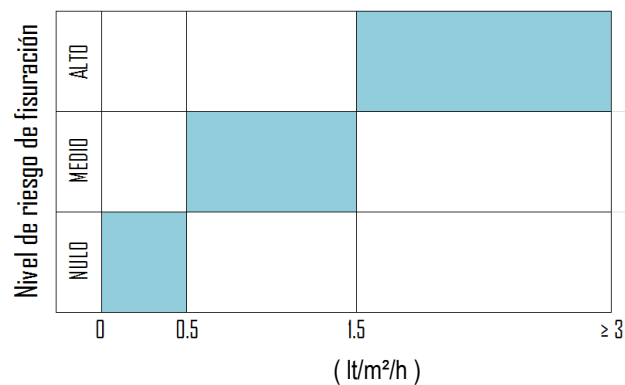
Fuente: Germán Hermida

2.2.4 Relación de variables que intervienen en la evaporación del agua.

Conociendo los valores de los parámetros meteorológicos se puede conocer el riesgo de formación de fisuras por retracción plástica, por lo tanto se podrán tomar las medidas preventivas para disminuir o evitar la evaporación de agua del hormigón.

En la figura 17 se muestra una estimación del nivel de riesgo de fisuración para diferentes tasas de evaporación de agua del hormigón, con las cuales se forman fisuras por retracción plástica.

Figura 17 Nivel de riesgo de fisuración por retracción plástica

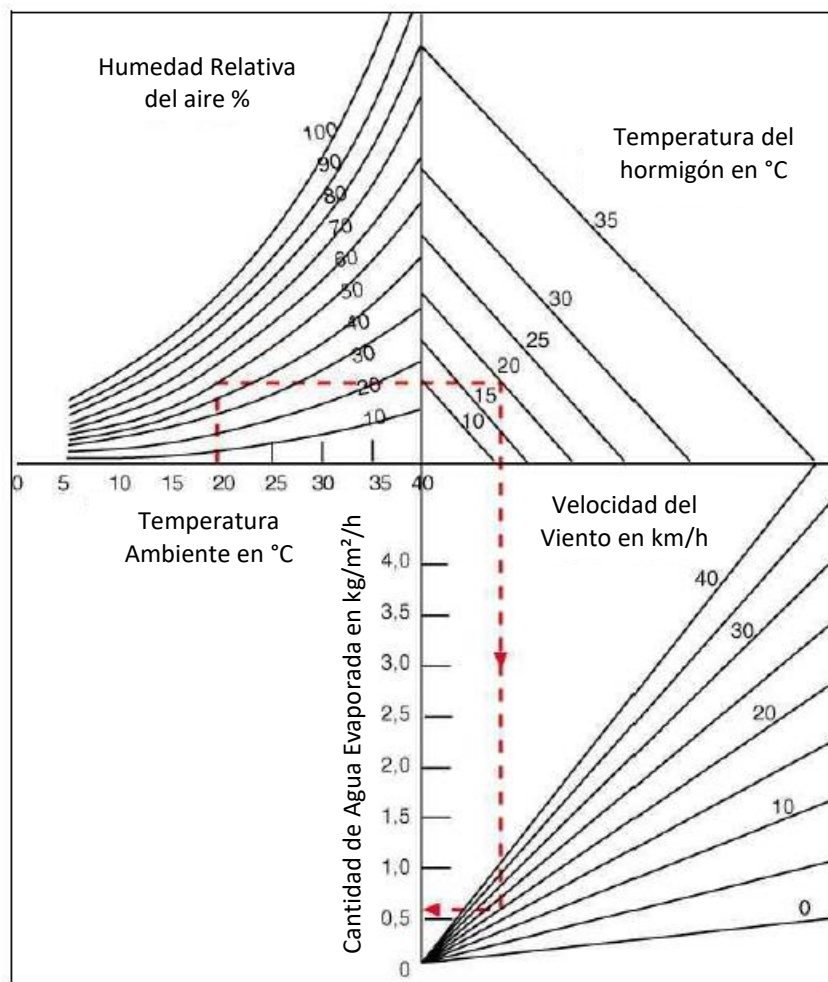


Fuente: Construcciones II (Texto guía), UAJMS, Ing. David Zenteno Benítez

El investigador Powers en los años treinta enunció que la tasa de exudación de un hormigón varía entre 1.15 a 4.10 kg/m²/h, el punto era entonces averiguar bajo qué condiciones el hormigón empezaba a evaporar a tasas superiores a las normales de exudación. El Comité ACI 305R entregó una herramienta muy útil a la construcción para determinar la evaporación de una superficie saturada, se trata del nomograma de Menzel. El mismo Comité recomendó a los constructores no permitir tasas de evaporación superiores a 1 kg/m²/h, tomando así un valor de seguridad frente a los valores entregados por Powers.

La figura 18 muestra el nomograma de Menzel que resume de una manera muy práctica la evaporación de agua del hormigón:

Figura 18 Nomograma de Menzel



Fuente: Comité ACI 305R

El Instituto Mexicano del Cemento y Concreto presenta el siguiente cuadro que muestra las combinaciones climatológicas con las cuales se podrían formar fisuras por retracción plástica, bajo estas combinaciones se debe tomar medidas preventivas.

Cuadro 3 Combinaciones de viento, temperatura y humedad cuando la tasa de evaporación se acerca a 1 kg/m²/h

Condiciones de viento		Temperatura Ambiente	Humedad Relativa*	Temperatura del hormigón
Velocidad (km/h)	Descripción	(°C)	(%)	(°C)
10	Ligero	25	25	30
10	Ligero	30	52	35
-	-	34	40	35
20	Moderado	20	50	25
20	Moderado	25	70	30
20	Moderado	30	91	35
-	-	35	50	32
30	Fresco	15	40	20
30	Fresco	20	70	25
30	Fresco	29	100	33
40	Fuerte	10	45	15
40	Fuerte	15	70	20
40	Fuerte	20	90	25
40	Fuerte	23	100	28

* Mientras más bajo sea el valor de la humedad relativa, será mayor la tasa de evaporación.

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto

2.2.5 Influencia del viento en la velocidad de evaporación del agua.

El factor decisivo para la formación de fisuras por retracción plástica es la evaporación del agua de la superficie del hormigón fresco, esto se ha confirmado tanto por ensayos de laboratorio, como de obra a escala real. Teniendo una influencia decisiva los vientos, mucho más que las altas temperaturas ambientes, como ha quedado demostrado en múltiples investigaciones realizadas⁹.

En las Instrucciones y Códigos de la buena práctica del hormigón se destina siempre un apartado, bien en forma de artículo preceptivo o de recomendación, donde se trata de la colocación del hormigón en tiempo caluroso. Se define el tiempo caluroso y se dice: "*Que cuando el hormigonado se efectúe en tiempo caluroso, se adoptarán las medidas*

⁹ Ref. Bibliográfica 1

oportunas para evitar la evaporación del agua de amasado, en particular durante el transporte del hormigón y para reducir la temperatura de la masa". La definición anterior es muy simplista y no hace hincapié en concienciar al usuario del hormigón, del gran peligro del viento en la formación y aparición de fisuras, haciéndole estar en la creencia de que el sol y la temperatura son las principales causantes.

Quizás una de las definiciones más amplias y completas de "Hormigonado en tiempo caluroso", que considera todos los parámetros que concurren en la formación de las fisuras de retracción plástica, es la que se da en el Manual Práctico del Hormigón del ACI, parte 2, que dice *"El tiempo caluroso se define como cualquier combinación de altas temperaturas, baja humedad relativa y velocidad del viento, que tiendan a empeorar la calidad del hormigón fresco o endurecido o que le confiera propiedades anormales"*. Por ello algunos investigadores creen que sería muy interesante incluir un artículo o recomendación acerca del "Hormigonado en tiempo VENTOSO".

2.2.6 Medidas para evitar la fisuración por retracción plástica.

Cuando el hormigón ha endurecido las fisuras por retracción plástica son muy difíciles de tapar, bien con lechadas de cemento (remedio más aparente que eficaz), o con resinas epóxicas, buen remedio pero caro y laborioso. Si estas fisuras se aprecian antes de que termine el fraguado del hormigón, es fácil hacerlas desaparecer apisonando sus bordes (ver figura 19) con golpes no excesivamente fuertes, pero sí con un cierto ritmo para que se transmitan a la masa del hormigón tomando ese aspecto gelatinoso como la de un flan. Con esta operación se hace desaparecer las fisuras, pues los bordes del corte de separación que ha hecho la fisura de arriba a abajo, se vuelven a juntar y a unir permitiendo que la red de cristalización de la hidratación de los silicatos crezca como si nada hubiera ocurrido, pero con algún riesgo de que vuelvan a aparecer.

A continuación se describen las principales precauciones que se pueden adoptar en la dosificación del hormigón y en el momento del hormigonado, para disminuir al mínimo la posibilidad de que se produzcan fisuras por retracción plástica:

1. Menor cantidad de cemento.
2. Reducción de la relación a/c.

3. Control riguroso del tipo y calidad si se usan aditivos retardadores en tiempo caluroso.
4. Proteger la superficie del hormigón recién enrasado por medio de un rociado con agua, con ayuda de una boquilla de nebulización.
5. Humedecer la subrasante y los moldes o encofrados.
6. Humedecer los agregados si están secos y si son absorbentes.
7. Levantar rompevientos para reducir la velocidad del viento sobre la superficie de hormigón.
8. Disminuir la temperatura del hormigón fresco durante clima caliente usando agregados y agua de mezcla fríos.
9. Evitar el excesivo calentamiento del hormigón plástico durante el tiempo frío.
10. Proteger el hormigón con cubiertas mojadas temporales cuando se produzcan retrasos apreciables entre el vertido y el acabado.
11. Reducir el tiempo entre el vertido y el principio del curado mejorando los procedimientos de construcción.
12. Como alternativa de los nuevos materiales de construcción se puede usar fibras como refuerzo tridimensional en el hormigón.

Figura 19 Fratasado de una losa de hormigón



Fuente: Jorge Eduardo Cedeño Cuellar, 2009, Tesina

2.2.7 Ensayo a escala real sobre la retracción plástica.

Algunos investigadores del fenómeno de la retracción plástica, optaron por realizar ensayos a escala real, para poder comprender mejor este fenómeno.

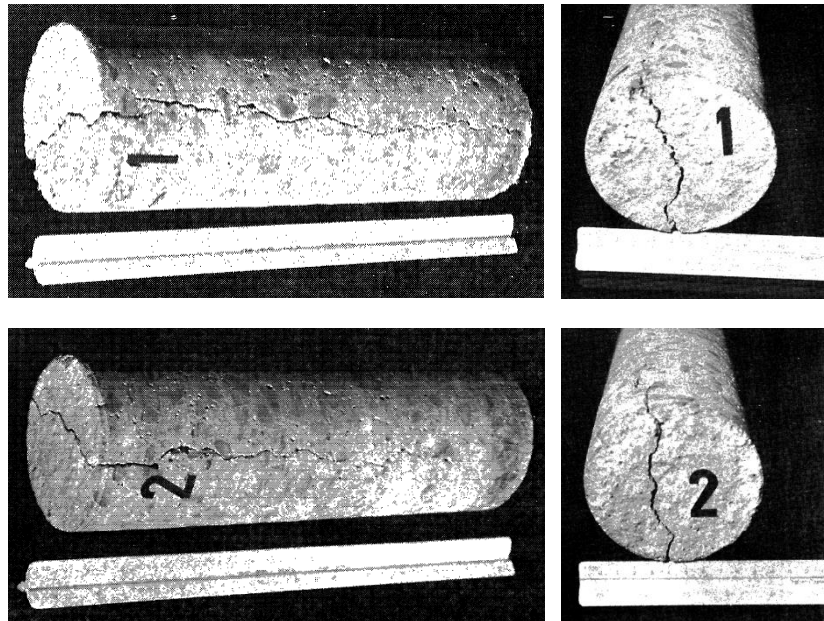
El investigador español Aguanell García M. representante del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Madrid-España, en su artículo sobre materiales de construcción denominado “Formación de grietas de retracción plástica en hormigones y morteros frescos”¹⁰, informa de un ensayo realizado a escala real, en el cual se preparó muestras de losas, sobre las que se levantó en la parte central un tabique, que era una lámina de plástico de cortaviento. Una de las mitades se resguardó del viento, no del sol, y la otra mitad se sometió a corrientes de vientos producidas por dos ventiladores eléctricos.

A los sesenta minutos después del vertido del hormigón y aireado con los ventiladores, empiezan a aparecer indicios de fisuras, a los noventa minutos estas fisuras se estabilizan y no progresan más. El investigador afirma lo siguiente: “es corriente en obra observar que cuando se han formado estas fisuras se pretende evaluar su profundidad intentando introducir una cartulina, un alambre fino, astillas de maderas o briznas de paja, pero como es lógico estos utensilios sólo se introducen en la fisura muy pocos milímetros, llegándose a la conclusión errónea de que son fisuras superficiales”.

En el ensayo realizado, una vez endurecido el hormigón y a la edad de catorce días, se procedió a extraer testigos de la parte de la losa de hormigón afectada por las fisuras como se muestra en la figura 20, de manera que se ubique la fisura en medio del cilindro. En la citada figura se ve cómo la fisura va de arriba a abajo en toda su altura (30 cm) formando una V cuyo vértice, situado en la parte inferior, está cerrado, de forma que si se mirara la losa por su cara inferior no se verían las fisuras, llegándose a pensar que eran fisuras sólo superficiales; estas fisuras registraron anchos entre 1 a 3 mm, como se puede apreciar en la figura 20. Hay que enfatizar en lo desastrosas que son estas fisuras tanto en la apariencia del hormigón como en su durabilidad, ya que son puertas abiertas para dar paso a aguas de lluvia y agentes agresivos de tipo químico.

¹⁰ Ref. Bibliográfica 1

Figura 20 Testigos de fisuras por retracción plástica



Fuente: Aguanell García M.

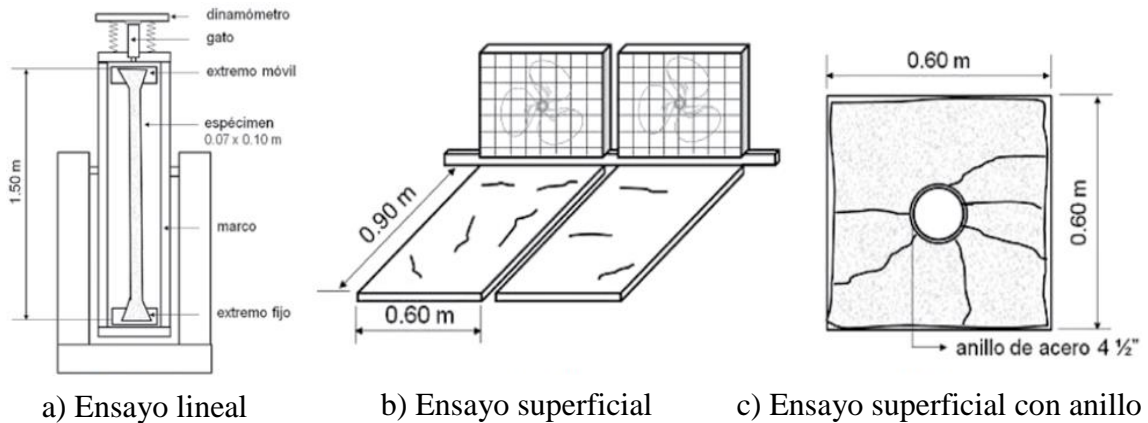
2.3 Métodos de evaluación de fisuras por retracción plástica.

Existen varias técnicas para estudiar las fisuras por retracción¹¹, entre estos se puede mencionar los especímenes lineales con restricción en los extremos o con un extremo fijo y el otro móvil, el espécimen tipo losa donde las restricciones son perpendiculares y el espécimen tipo anillo. Aunque son efectivas para mediciones en laboratorio, la mayoría de estas técnicas producen esfuerzos en el espécimen que son diferentes a los que ocurren en las aplicaciones prácticas.

Desafortunadamente, es difícil proporcionar suficiente restricción para producir la fisuración en especímenes lineales de hormigón, algunos investigadores han usado especímenes largos con extremos ensanchados y restringidos, de sección transversal pequeña para producir la fisuración por retracción, ver a) de la figura 21. Otros investigadores han usado especímenes tipo losa para simular la fisuración debido a la retracción, ver b) de la figura 21, en este tipo de restricción la retracción se presenta en dos direcciones. Otros investigadores han usado otros tipos de losa con anillos para generar la restricción y producir las fisuras, ver c) de la figura 21.

¹¹ Ref. Bibliográfica 9

Figura 21 Tipos de especímenes usados en ensayos de retracción



Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 2011

A continuación se presenta las normas de evaluación de fisuras por retracción plástica, que actualmente se usan para analizar el desempeño de las fibras incorporadas al hormigón.

Método de prueba del panel rectangular ASTM C1579: Entre los métodos de prueba que actualmente son empleados para evaluar la potencial fisuración del hormigón debido a la retracción plástica a edades tempranas está el expuesto en ASTM C1579 (*Método de prueba estándar para la evaluación del agrietamiento por retracción plástica restringida del hormigón reforzado con fibras*). Este método evalúa la retracción plástica mediante la comparación del patrón de fisuración de superficies de paneles rectangulares de hormigón reforzado con fibras, con el patrón de fisuras de paneles rectangulares de un hormigón de referencia sin fibras, sometidas a condiciones específicas de alta evaporación.

Método de prueba del anillo ACI 544.2R: Otro método de prueba que ha sido usado durante muchos años por un gran número de investigadores es el ensayo tipo anillo, reportado en el ACI 544.2R (*Medición de las propiedades del hormigón reforzado con fibra*), fue desarrollado en Noruega. El ensayo tipo anillo ha mostrado ser un método que proporciona un grado de restricción elevado y constante que permite resultados consistentes en muestras de pasta, mortero y hormigón.

2.4 Uso histórico del hormigón reforzado con fibras.

2.4.1 Inicio de los materiales reforzados con fibras.

Los materiales de construcción también tienen sus ciclos vitales: nacen, se desarrollan y acaban desapareciendo; las razones por las cuales van sucediendo las distintas etapas son muy diversas, pero fundamentalmente se pueden reducir a un origen común: la exigencia técnica de satisfacer las necesidades que van surgiendo, con carácter cambiante en la vida del hombre. Ello determina la aparición de nuevos materiales y su difusión más o menos rápida, así como su desaparición, o sustitución, cuando esos materiales han quedado obsoletos, incapaces de responder a las nuevas necesidades para los que son requeridos.

El empleo de fibras como un refuerzo en materiales frágiles o quebradizos no es algo reciente, sino que constituye una técnica utilizada desde hace miles de años. Las fibras se han utilizado históricamente para reforzar materiales frágiles, hace 4000 años en la baja Mesopotamia, Babilonia y Egipto las fibras vegetales como la paja se combinaron con mezclas de arcilla para fabricar adobes de barro cocidos al sol, existen innumerables evidencias arqueológicas que dan fe de este hecho. Los pelos de caballo o incluso de cabra se utilizaban para los revoques de yeso. A finales del siglo XIX empezó el uso de fibras de asbesto (hoy prohibidas) que mezcladas con pasta de cemento formaban el fibrocemento, cuyo propósito era incrementar su resistencia a flexotracción y a su vez conseguir elementos prefabricados exentos de fisuración y con buena resistencia al impacto¹².

2.4.2 Breve reseña histórica del hormigón reforzado con fibras.

Las fibras metálicas fueron una de las primeras adiciones experimentadas en el hormigón como material de construcción, la primera patente de hormigón reforzado con elementos metálicos se realizó en California en 1874 por A. Berard, consistía en una piedra artificial que utilizaba acero granular procedente de desechos para el refuerzo del hormigón. El siguiente antecedente lo encontramos en 1911, año en el que Graham utilizó por primera vez fibras de acero para incrementar la resistencia y estabilidad del

¹² ACI 544.1R, 1996

hormigón armado convencional. También se destaca la patente de G. Martin en 1927 en California, que describe la adición de alambres de acero rizados en el hormigón empleado en tuberías.

Al transcurrir los años, la forma de las fibras se fueron perfeccionando y en las patentes se emplean parámetros muy similares a los actuales para fibras de acero, ejemplo de ello es la patente creada en 1954 en Estados Unidos por G. Constantinesco, que se refería al uso de fibras helicoidales y espirales para aumentar la resistencia a la fisuración y la absorción de energía en el hormigón. En 1963 se destacaron los estudios científicos de Romualdi–Batson y Romualdi–Mandel sobre fibras discontinuas distribuidas aleatoriamente. No fue sino hasta 1971 cuando en Estados Unidos se hicieron estudios e investigaciones dirigidos al uso del hormigón reforzado con fibras a gran escala, desde entonces esta práctica es un elemento indispensable en la construcción de losas, pisos industriales de alto desempeño, elementos estructurales prefabricados, tableros de puentes, hormigones lanzados para la estabilización de taludes, revestimientos de túneles, bóvedas, entre otros¹³.

Las fibras sintéticas han tenido un uso más tardío en el sector de la construcción, pero en la actualidad han empezado a tener gran popularidad, debido a que presentan algunas ventajas porque son livianas y bastante resistentes.

2.4.3 Situación actual del hormigón reforzado con fibras.

Así como lo manifiesta el ACI, hoy en día el uso del hormigón reforzado con fibras ha pasado de las pequeñas escalas de aplicación experimental al empleo del material a grandes escalas de trabajo de campo, lo cual implica el uso de cientos de miles de metros cúbicos por año en todo el mundo. Nuevas investigaciones han abierto la posibilidad de utilizar otros materiales como las fibras sintéticas en el HRF que presentan grandes prestaciones desde el punto de vista tecnológico tales como elevado módulo de elasticidad, alta resistencia a tracción, baja densidad; la importancia de estas características resulta clave especialmente desde el punto de vista de su desempeño.

¹³ Jonhston, 1994

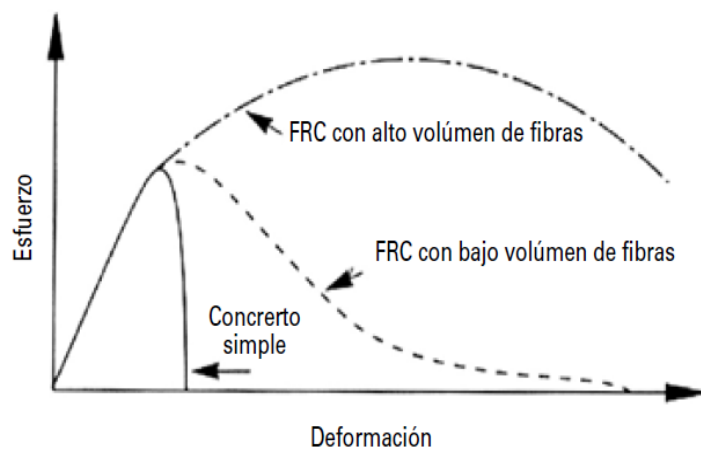
La industria del hormigón premezclado está cada vez más acostumbrada a adoptar nuevas tecnologías en materia de aditivos y adiciones, con la finalidad de mejorar la calidad del hormigón y brindarle características acordes con los diseños estructurales cada vez más exigentes. Es por ese motivo que ésta industria ya provee hormigón premezclado reforzado con fibras, dando el valor agregado al contratista para que éste tenga una solución que le permita ahorrar tiempo, dinero y construir sus obras con mayor seguridad.

2.5 Las fibras como refuerzo del hormigón.

El hormigón reforzado con fibras ha sido utilizado con gran éxito, debido a los beneficios que le brinda a las estructuras como evitar la fisuración, mayor resistencia al impacto, menor permeabilidad, mayor durabilidad, mejor comportamiento frente al fuego y evitar la rotura frágil del hormigón.

Una propiedad importante que se mejora en el HRF es la tenacidad, que es la capacidad que tiene el hormigón para absorber energía, ésta se define como el área bajo la curva esfuerzo-deformación o carga-deflexión. En la figura 22 se puede ver que al agregar fibras al hormigón se incrementa en forma importante la tenacidad del material, ya que después de aparecer la primera fisura el HRF es aún capaz de soportar cargas bajo flexiones o deformaciones.

Figura 22 Curvas esfuerzo-deformación para HRF



Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 2007

2.5.1 Características de las fibras para reforzar el hormigón.

Las fibras para reforzar el hormigón deben ser económicas y fáciles de usar, entre los requisitos físicos y técnicos que debe cumplir se incluyen los siguientes:

- Tienen que ser fáciles de mezclar, en mezcladoras convencionales de hormigón.
- Deben dispersarse uniformemente sin segregarse.
- No deben sobresalir de la superficie.
- Debe ser invisible cuando se desgasta la superficie del hormigón.
- Debe tener una elevada resistencia a la tracción y elevado módulo de elasticidad.
- Su adherencia con el hormigón debe ser buena.
- Debe ser químicamente resistente a la alcalinidad del hormigón.
- Puede utilizarse con seguridad siguiendo las prácticas de trabajo recomendadas.
- Deben tener una alta relación de aspecto, es decir, deben ser bastante largas con relación a su diámetro.

2.5.2 Dosificaciones de fibras comúnmente usadas.

Por razones económicas, la tendencia actual en la práctica del HRF es la de minimizar el volumen de las fibras, en cuyo caso las mejoras en las propiedades mecánicas pueden ser marginales, tal es el caso de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del compuesto, sin embargo los beneficios vendrían asociados a hormigones sin fisuras y con mayor resistencia a impactos.

De acuerdo al Instituto Mexicano del Cemento y Concreto las dosificaciones de fibras por volumen comúnmente usadas son:

- Para fibras de acero menos del 1%.
- Para fibras de polipropileno aproximadamente 0.1%.
- Para macrofibras desde 0.2% a 0.8%.
- Para microfibras desde 0.03% a 0.15%.

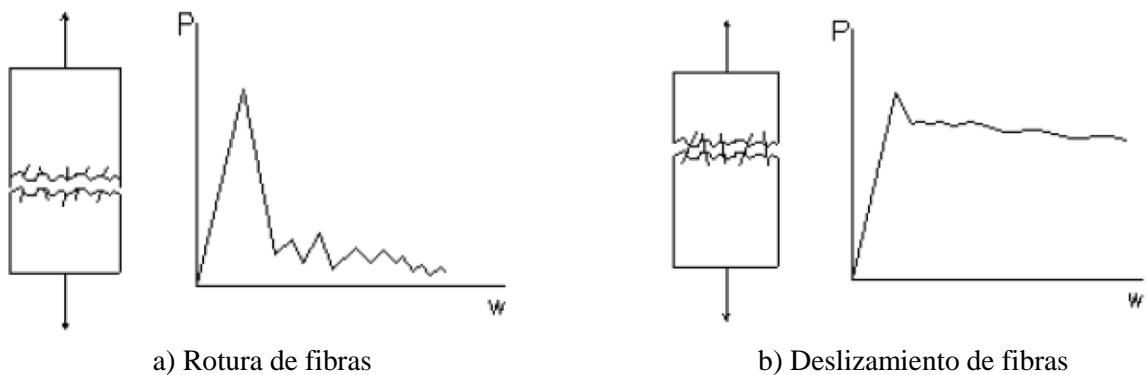
También se debe tener en cuenta que las concentraciones de un alto volumen de ciertas fibras pueden hacer que el hormigón fresco no pueda trabajarse.

2.5.3 Fases de un hormigón reforzado con fibras.

2.5.3.1 Fase fibrosa.

Las fibras se diseñan para que no alcancen su límite elástico, antes de alcanzarlo deben deslizarse para desarrollar su máxima eficiencia. La razón es que todas las fibras que cosen una fisura tienen diferente longitud de anclaje y orientación. Esto significa que las deformaciones en las diversas fibras durante la apertura de la fisura son muy distintas, existiendo la posibilidad de que algunas de ellas rompan mientras que otras aún están sometidas a tracciones bajas como se muestra en a) de la figura 23. No obstante, si las fibras se deslizan en lugar de romperse, su resistencia total a tracción será muy importante, consiguiendo además una gran ductilidad, evitando así la rotura frágil como se muestra en b) de la figura 23. De esto se deduce que la longitud de anclaje debe ser suficientemente grande para garantizar la adherencia y suficientemente pequeña para permitir el deslizamiento de las fibras.

Figura 23 Comportamiento de las fibras ante esfuerzos de tracción



Fuente: Jorge Eduardo Cedeño Cuellar, 2009, Tesina

2.5.3.2 Fase matriz.

La fase matriz de un material compuesto con fibras ejerce varias funciones. En primer lugar une las fibras actuando como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados, sólo una pequeña fracción del esfuerzo aplicado es resistido por la matriz la cual debe ser dúctil, el módulo elástico de las fibras debe ser

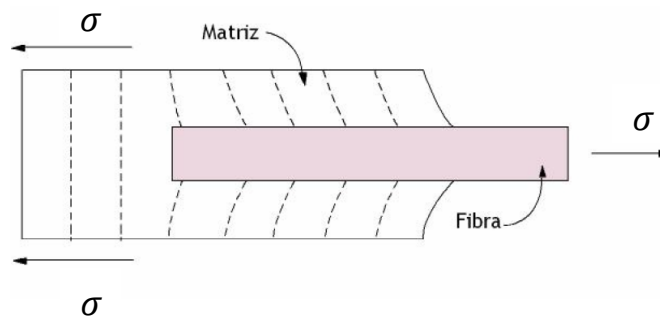
mucho mayor que el de la matriz. En segundo lugar, la matriz protege a las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente. Estas interacciones introducen defectos superficiales capaces de originar fisuras, que podrían producir fallos con esfuerzos de tracción bajos.

Finalmente la matriz separa las fibras, en virtud de su relativa blandura y plasticidad impide la propagación de fisuras de una fibra a otra, que originaría fallos en la pieza; en otras palabras, la matriz actúa como una barrera que evita la propagación de fisuras. Aunque algunas fibras individuales se rompan, la rotura total del material compuesto no ocurrirá hasta que se hayan roto un gran número de fibras adyacentes.

2.5.4 Influencia de la longitud de las fibras.

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. En este proceso de transmisión de carga es muy importante la magnitud de la unión en la interfaz de las fases matriz y fibra. Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación como el que se muestra en la figura 24, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz.

Figura 24 Patrón de deformación de una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción

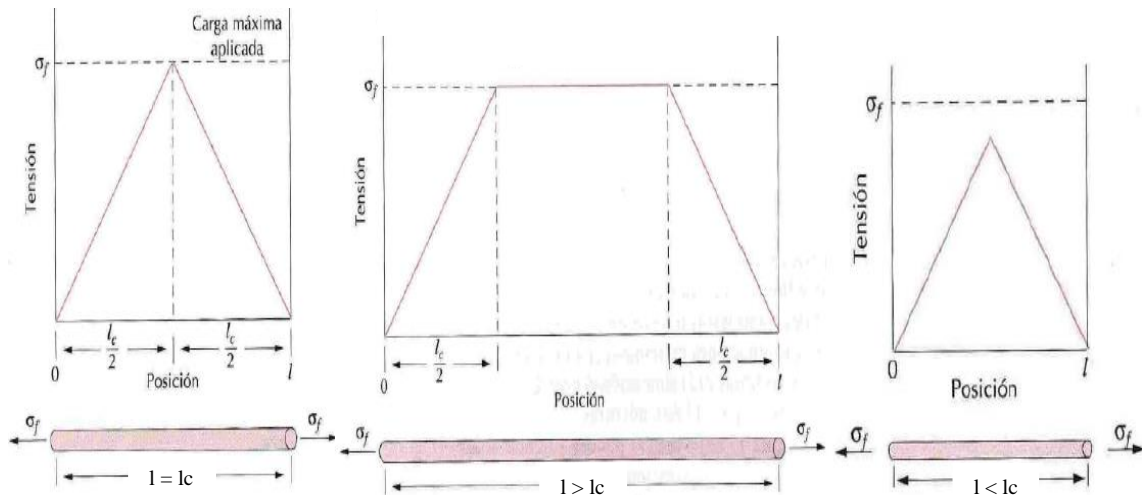


Fuente: Maria del Mar Nogueira López

Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica l_c depende del diámetro d de la fibra, de la resistencia a la tracción σ_f y de la resistencia de la unión matriz-fibra.

Las fibras con $l \gg l_c$ (normalmente $l > 15 l_c$) se denominan *continuas* y las fibras de menor longitud se denominan *discontinuas* o *fibras cortas*. En las fibras discontinuas de longitud significativamente menor que l_c , la matriz se deforma alrededor de la fibra de modo que apenas existe transferencia del esfuerzo y el efecto del refuerzo de la fibra es insignificante.

Figura 25 Transferencia de esfuerzos en una fibra



Fuente: Maria del Mar Nogueira López

2.6 Clasificación de las fibras.

Debido al gran uso de las fibras, se han creado distintos tipos de fibras con diferentes características, a continuación se describen las clasificaciones más usuales.

2.6.1 Por su origen.

Las fibras de acuerdo a su origen se clasifican en:

- Fibras inorgánicas.
- Fibras sintéticas orgánicas.
- Fibras naturales orgánicas.

2.6.1.1 Fibras inorgánicas.

Las fibras inorgánicas fueron las primeras con las cuales se experimentó el refuerzo del hormigón. Se conocen dos tipos de fibras:

- Fibras de Acero.
- Fibras de Vidrio.

2.6.1.2 Fibras sintéticas orgánicas.

Las fibras sintéticas son artificiales, resultan de la investigación y desarrollo en las industrias petroquímicas y textiles. Son diseñadas para resistir el medio alcalino del hormigón a largo plazo, su uso en proporciones típicas no requiere de ningún cambio en el diseño de la mezcla y se considera que la resistencia del hormigón no se ve afectada, sin embargo las fibras sintéticas reducen la fisuración plástica del hormigón, esto mejora su resistencia al impacto, en el cuadro 4 se muestran las propiedades de estas fibras.

Cuadro 4 Propiedades de fibras sintéticas orgánicas

Tipo de fibra	Diámetro equivalente (µm)	Densidad relativa	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento último (%)	Temperatura de ignición (°C)	Temperatura de fusión, oxidación o descomposición (°C)	Absorción del agua según ASTM D570 (% por masa)
Acrílicas	13–104	1.16–1.18	270–1000	14–19	7.5–50	–	220–235	1–2.5
Aramida I	12	1.44	2900	60	4.4	alta	480	4.3
Aramida II	10	1.44	2350	115	2.5	alta	480	1.2
Carbón PAN HM	8	1.6–1.7	2500–3000	380	0.5–0.7	alta	400	nula
Carbón PAN HT	9	1.6–1.7	3450–4000	230	1–1.5	alta	400	nula
Carbón brea GP	10–13	1.6–1.7	480–790	27–35	2–2.4	alta	400	3–7
Carbón brea HP	9–18	1.8–2.15	1500–3100	150–480	0.5–1.1	alta	500	nula
Nylon	23	1.14	970	5	20	–	200–220	2.8–5
Poliéster	20	1.34–1.39	230–1100	17	12–150	600	260	0.4
Polietileno	25–1000	0.92–0.96	75–590	5	3–80	–	130	nula
Polipropileno	–	0.90–0.91	140–700	3.5–4.8	15	600	165	nula

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 2007

2.6.1.3 Fibras naturales orgánicas.

Las fibras naturales orgánicas existen en abundancia y su adquisición es de bajo costo, por ello en países de poco desarrollo y con bajas economías, las fibras naturales orgánicas son una forma muy común para reforzar hormigones y morteros.

Estas fibras de origen vegetal suelen tener bajos módulos de elasticidad, altos grados de absorción de agua, en ocasiones suelen ser propensos a ataques de hongos y bacterias y sus propiedades son variables en fibras del mismo tipo.

La literatura reporta más de 40 países, que de diversas maneras usan fibras naturales orgánicas en sus procesos constructivos, en el cuadro 5 se muestran algunos países que usan este tipo de fibras.

Cuadro 5 Fibras naturales orgánicas utilizadas en algunos países

País	Fibras más utilizadas
Australia	Coco, Bambú, Celulosa, Algodón
Bangladesh	Bambú
Botswana	Sisal
Brasil	Bambú
Dinamarca	Celulosa
Rep. Dominicana	Sisal
México	Henequén, Maguey, Lechuguilla
El Salvador	Celulosa
Cuba	Henequén

Fuente: José A. Macías Mesa

Los trabajos de investigación desarrollados con este tipo de fibras están muy determinados por las fibras propias que posee cada país, específicamente para aplicaciones de carácter local.

Los países desarrollados, en especial Gran Bretaña y Suecia, han llevado a cabo las investigaciones fundamentales acerca del uso de fibras naturales orgánicas en países tercermundistas, que son las que las poseen mayoritariamente. Entre las investigaciones se destacan los Talleres de Materiales de Construcción de Gran Bretaña y las realizadas por el Instituto de Investigación Sueco de Cemento y Concreto de Suecia¹⁴.

¹⁴ Ref. Bibliográfica 11

2.6.2 Por su funcionalidad.

Las fibras de acuerdo a su funcionalidad se clasifican en:

- Microfibras, tienen diámetros < 0.30 mm (No estructurales).
- Macrofibras, tienen diámetros > 0.30 mm (Estructurales).

2.6.2.1 Microfibras.

Las microfibras se emplean en el hormigón principalmente para reducir la fisuración por retracción plástica, aumentar su resistencia al impacto, reducir su permeabilidad y mejorar su comportamiento frente al fuego, las microfibras nunca asumen funciones estructurales. Las microfibras se dosifican en cantidades extremadamente bajas pero son muy eficientes, además de ser económicas. Es por ello que su uso resulta muy extendido sobre todo en losas, pisos industriales, prefabricados y en general a todos los materiales cementicios, con una alta relación superficie-expuesta/volumen.

Figura 26 Microfibras



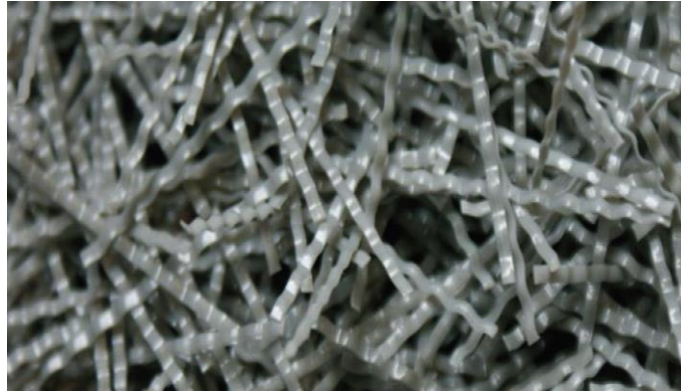
Fuente: Sika Colombia, 2010

2.6.2.2 Macrofibras.

Las macrofibras pueden colaborar estructuralmente al hormigón, están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, a reducir el ancho de la fisura si ésta se presenta y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada. Las macrofibras más usadas son las sintéticas y las metálicas. La relación de aspecto (L/d) de

las macrofibras varía entre 20 a 100 y normalmente exigen un tiempo de mezclado adicional de entre 3 a 5 minutos para garantizar su completa dispersión.

Figura 27 Macrofibras



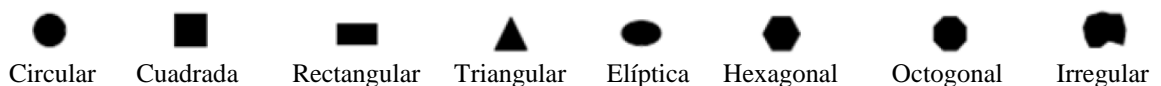
Fuente: Sika Colombia, 2010

2.6.3 Por su sección transversal.

En general la sección transversal de las fibras puede presentar distintas configuraciones, desde las más habituales y extendidas en el mercado como lo son las circulares, hasta secciones irregulares. Se clasifican en las siguientes:

- Fibras circulares.
- Fibras cuadradas.
- Fibras rectangulares.
- Fibras triangulares.
- Fibras elípticas.
- Fibras hexagonales.
- Fibras octogonales.
- Fibras irregulares.

Figura 28 Secciones transversales de las fibras más comunes



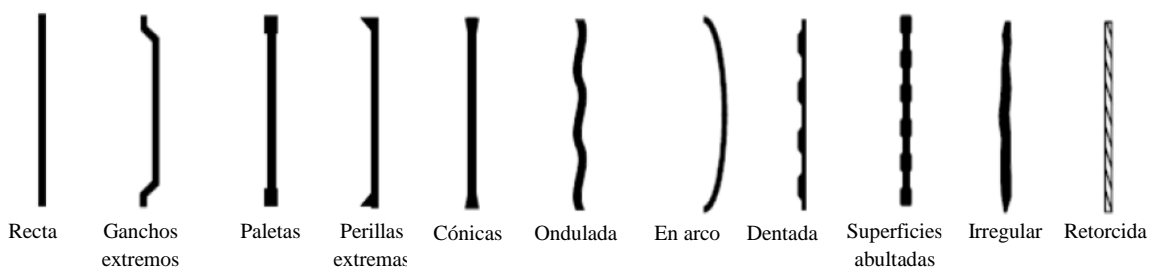
Fuente: Pablo Pujadas Álvarez, Tesina

2.6.4 Por su forma.

Debido a que la adherencia entre las fibras y el hormigón es uno de los factores que en mayor medida determina las propiedades del HRF, los fabricantes de fibras han intentado mejorar dicha adherencia modificando la forma geométrica de las fibras. Se clasifican en:

- Fibras rectas.
- Fibras de ganchos extremos.
- Fibras de paletas.
- Fibras de perillas extremas.
- Fibras cónicas.
- Fibras onduladas.
- Fibras en arco.
- Fibras dentadas.
- Fibras de superficies abultadas.
- Fibras irregulares.
- Fibras retorcidas.
- Fibras helicoidales.

Figura 29 Formas de las fibras más comunes



Fuente: Pablo Pujadas Álvarez, Tesina

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de esta investigación se usaron dos tipos de fibras, una de origen sintético (fibras Acrílicas) y otra de origen orgánico (fibras de Caraguata).

3.1 Características de las fibras Acrílicas.

Al ser las fibras Acrílicas un producto comercial, las características de esta fibra fueron proporcionadas por el proveedor al momento de la adquisición del producto.

3.1.1 Procedencia de las fibras Acrílicas.

Las fibras Acrílicas utilizadas en esta investigación, son un producto de la empresa “Sudamericana de Fibras” que es una empresa que provee este tipo de fibras en el mercado nacional, la denominación de la fibra es “Drymix RC 4020”.

3.1.2 Tipo de fibra.

Drymix RC 4020 es una microfibra Acrílica de origen sintético de alta tenacidad, que ha sido diseñada para que al ser mezclada con el hormigón, mitigue fisuras por retracción plástica. Tiene sección transversal circular y alineación recta, es resistente a medios ácidos y alcalinos, no contiene productos corrosivos.

Figura 30 Eficiencia de las fibras Drymix RC 4020



a) Con Drymix

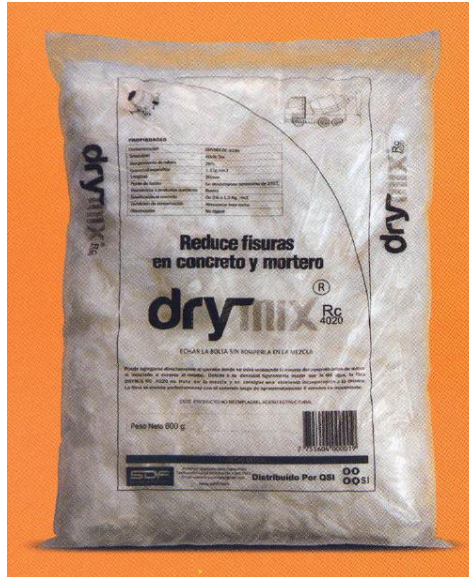
b) Sin Drymix

Fuente: Sudamericana de fibras

3.1.3 Presentación de las fibras Acrílicas.

Drymix RC 4020 se comercializa en bolsas hidrosolubles de 600 gramos y también en fardos ideales para el manipuleo y dosificación en la mezcladora o en el mixer.

Figura 31 Fibras Drymix RC 4020



Fuente: Sudamericana de fibras

3.1.4 Modo de uso de las fibras Acrílicas.

El modo de uso de las fibras Acrílicas es el siguiente:

- Pueden agregarse directamente al camión mixer o donde se esté realizando la mezcla, ya sea al comienzo del proceso o durante el desarrollo del mismo.
- Se mezclan perfectamente con el hormigón luego de cinco minutos de agitación.
- Se venden en bolsas solubles en agua, así se incorporan directamente a la mezcla del hormigón, que al tener agregados gruesos provoca una correcta dispersión en la mezcla.
- Actúa inmediatamente después del vaciado del hormigón, es una fibra que al ser agregada al hormigón se incorpora fácilmente a la matriz.
- Debido a su densidad, ligeramente mayor que la del agua, las fibras no flotan en la mezcla y se consigue una excelente incorporación a la misma.

3.1.5 Beneficios de las fibras Acrílicas.

Las fibras Acrílicas benefician al hormigón en los siguientes aspectos:

Evita las fisuras por retracción plástica en el estado fresco y por temperatura en el estado endurecido.

Aumenta la durabilidad, ya que a través de las fisuras pueden ingresar sustancias perjudiciales que afecten el desempeño de la estructura disminuyendo su durabilidad, esto incrementa el costo de su mantenimiento.

Disminuye la permeabilidad, lo que evita la migración del agua o de sustancias nocivas dentro de las estructuras.

Nota importante: Drymix RC 4020 no debe usarse como reemplazo de estructuras metálicas de refuerzo.

Figura 32 *Proyectos que usan Drymix RC 4020 en sus construcciones*



- a) Conjunto habitacional Derrama Magisterial de Piura. El proyecto consta de la construcción de más 1200 departamentos, distribuidos en más de 50 edificios.
- b) El proyecto consta de la construcción en 8 etapas de más de 2500 viviendas de un solo nivel.
- c) Urbanización San Gabriel de Chiclayo. El proyecto consta de la construcción de 6 edificios.

Fuente: Sudamericana de fibras

3.1.6 Propiedades de las fibras Acrílicas.

Las propiedades de las fibras Acrílicas se muestran en el cuadro 6 mismas que fueron proporcionadas por el proveedor.

Cuadro 6 Propiedades de las fibras Acrílicas

Denominación	Drymix RC 4020
Tenacidad	40 cN/Tex
Alargamiento a la rotura	26%
Densidad	1.17 gr/cm ³
Longitud	20 mm
Diámetro	0.008 mm
Punto de fusión	Se descompone por encima de 270 °C
Resistencia a productos químicos	Buena
Dosificación al hormigón	De 0.6 a 1.2 kg/m ³

Fuente: Sudamericana de fibras

3.2 Características de las fibras de Caraguata.

La Caraguata o Carahuata es una planta originaria tanto del chaco boliviano como argentino, utilizada por la cultura Weenhayek desde hace mucho tiempo atrás para diversos usos, por ejemplo: aclarar el agua, los frutos maduros que son carnosos y que están unidos entre sí les sirven como comida, la raíz molida sirve para cuajar la leche en la elaboración de queso y principalmente las fibras de sus hojas se usan en la fabricación de llicas, bolsones, prendas de vestir, redes de pescar, hamacas, adornos, etc., que se constituye en uno de sus ingresos económicos en tiempos de veda y de escasa pesca.

Las fibras de Caraguata, tienen una considerable resistencia a la tracción, como lo demuestran los productos que fabrican los Weenhayek y el trabajo de investigación elaborado en nuestra universidad denominado “Estudio y Análisis del Concreto Fibroreforzado Natural” siendo autoría del Ing. Marcelo Segovia Cortez, es por esta razón que se escogió esta fibra para reforzar al hormigón. La Caraguata presenta hojas lineales y aplanadas que miden de 0.5 a 1 metro de largo, armada de fuertes agujones

marginales y terminados en punta. Sus flores tienen una longitud de 4 a 5 centímetros de largo con sépalos blancos y pétalos azules.

Figura 33 Fibras de Caraguata



a) Plantas de Caraguata



b) Fibras de una hoja de Caraguata



c) Fibras de Caraguata de 2 cm

Fuente: Elaboración propia

La Caraguata se reproduce por medio de dos formas, la primera por medio de hijuelos por expansión de la raíz y la segunda por medio de las semillas que producen sus flores en forma natural, en ninguno de los casos interviene la mano del hombre, aunque sin duda mejoraría considerablemente la reproducción de esta planta si se usan técnicas apropiadas de cultivo.

En una gran parte de la provincia Gran Chaco del departamento de Tarija, crece la Caraguata en forma silvestre y abundante. Se desarrolla en climas cálidos, secos y con lluvias de verano que varían desde 350 mm a 600 mm anuales, con temperaturas medias de 24 °C, máximas de verano que llegan a los 42 °C y las temperaturas mínimas invernales que llegan a 0 °C. La Caraguata crece preferentemente en montes bajos xerófilos y ralos en forma silvestre, a una altura de 325 a 600 m.s.n.m.

A continuación se presenta el cuadro 7 que resume las condiciones climáticas bajo las cuales crece comúnmente la Caraguata:

Cuadro 7 Condiciones climáticas donde crece la Caraguata

Temperatura (°C)			Lluvias (mm)		Altitud (m.s.n.m.)	
Mínima	Media	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
0	24	42	350	600	325	600

Fuente: Ing. Marcelo Segovia Cortez

Se puede encontrar plantas de Caraguata en tres regiones del departamento¹⁵:

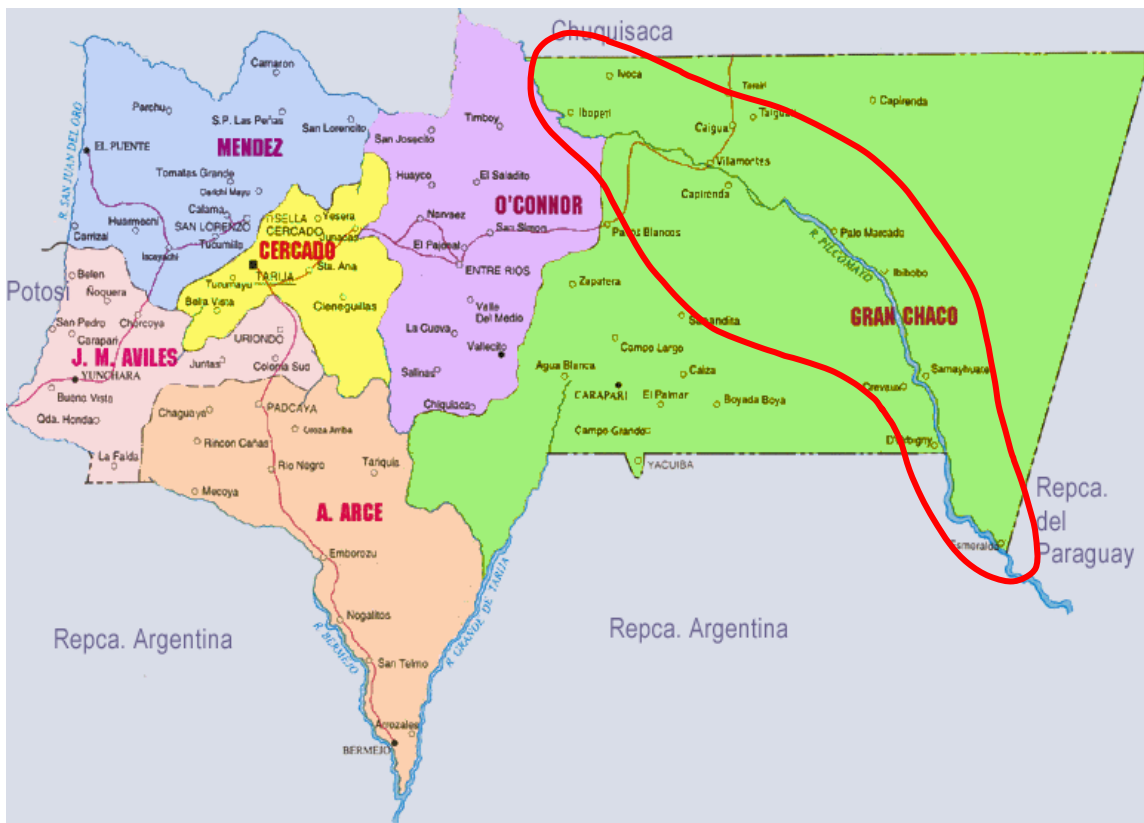
- A las márgenes de la carretera Palos Blancos – Chimeo.
- En el camino carretero Villa Montes – Yacuiba, en la provincia Gran Chaco, en la localidad de San Antonio, Aguaraycito, Palmar Grande. Estas poblaciones se encuentran a una altitud promedio de 600 m.s.n.m. y pertenecen a la cuenca del Pilcomayo.
- En los montes del río Pilcomayo provincia Gran Chaco, que se extiende a lo largo de este río, desde Villa Montes hasta D'Orbigny y Esmeralda, en un ancho de 1 a 2 km a ambas márgenes del río, a una altitud de 300 a 450 m.s.n.m.

¹⁵ Ref. Bibliográfica 20

Se encuentra plantas de Caraguata a ambos márgenes del río Pilcomayo. En la margen derecha desde Villa Montes a D'Orbigny, comprende las localidades de: Capirenda, San Bernardo, Villa Esperanza, Viscachera, Cabayunabi, Las Bateas, Tapera Vieja, Capricho, Crevaux, La Gaiba, Tuscal y Algarrobal. En la margen izquierda frente a las localidades de Cercado, Cururenda, Palo Marcado, Cabayo, Nambi, Paranamayo, Ibibobo, Quijarro, Samayhuate, La Puerta, Tuscal, Porvenir y Esmeralda.

El mapa mostrado a continuación, indica en forma gráfica las regiones donde existen plantas de Caraguata.

Figura 34 Regiones donde existen plantas de Caraguata



Fuente: Ing. Marcelo Segovia Cortez

Se realizó la clasificación taxonómica de la Caraguata¹⁶, la cual fue realizada por el Herbario Universitario de nuestra UAJMS, misma que se presenta a continuación:

¹⁶ Ver anexo 1.

Reino = Vegetal.
Phylum = Telemophytae.
División = Tracheophytae.
Subdivisión = Anthophyta.
Clase = Angiospermae.
Subclase = Monocotyledoneae.
Orden = Farinosales.
Familia = Bromeliaceae.
Nombre científico = Bromelia sp.
Nombre común = Caraguata.

3.2.1 Procedencia de las fibras de Caraguata.

Las fibras de Caraguata utilizadas en esta investigación son de la localidad Palmar Grande y se adquirieron de una productora Weenhayek en la localidad de Capirenda cercana a la población de Villa Montes de la provincia Gran Chaco.

3.2.2 Obtención de las fibras de Caraguata.

La obtención de las fibras de Caraguata, se la hace seleccionando y cortando las hojas sanas y de mayor longitud de la planta, posteriormente se sacan las espinas laterales de la hoja y la epidermis, después se deja secar al sol durante uno a dos días, para luego dejar en remojo 24 horas para que los hongos y bacterias ataquen a la celulosa. Al otro día se machucan encima de una madera con un hierro para eliminar la celulosa, inmediatamente después se lavan las fibras, como el procedimiento del lavado de ropa, y esta agua se vuelve espumosa y de un color blanco como si hubiese utilizado algún detergente. Se escurren y se dejan secar al sol uno a dos días, con esto el procedimiento queda completado. La extracción de las fibras también se puede realizar por medios mecánicos sin ningún tratamiento preliminar, las máquinas desfibradoras tienen un rendimiento de 45 kilogramos de fibra seca por día, con un consumo de 8 litros de gasolina, empleando un operador y un ayudante¹⁷.

¹⁷ Ref. Bibliográfica 20

3.2.3 Tipo de fibra.

Las fibras de Caraguata se clasifican como microfibras, ya que tienen un diámetro menor a 0.30 milímetros, son de origen orgánico y de alta resistencia a la tracción como se verá más adelante, tienen sección transversal muy próxima a una sección circular, y una alineación recta.

3.2.4 Propiedades de las fibras de Caraguata.

3.2.4.1 Longitud y diámetro.

Las pruebas para determinar la longitud y diámetro de las fibras de Caraguata fueron desarrolladas en los laboratorios de Física de la carrera de Ingeniería Civil de nuestra UAJMS.

Para determinar la longitud de las fibras de Caraguata, se utilizó una regla plástica transparente milimétrica de 1 metro de longitud, con una precisión de 1 mm. Para determinar el diámetro de las fibras de Caraguata, se utilizó un micrómetro con una precisión de 0.01 mm.

Figura 35 Medición del diámetro de una fibra de Caraguata



Fuente: Elaboración propia

El muestreo de fibras se hizo al azar, se tomaron 20 muestras de entre todas las fibras con las que disponía. El diámetro promedio de las fibras es de 0.048 mm y las longitudes varían desde 51.1 a 99.2 cm, con un promedio de 76.61 cm.

Cabe hacer notar que los diámetros de las fibras varían a lo largo del mismo, siendo más gruesas cerca de la raíz y más delgadas en las puntas de las hojas, es por ello que se midió los diámetros en tres secciones diferentes, una en cada extremo y una en el medio de la fibra.

A continuación se presenta el cuadro 8 que resume estos parámetros:

Cuadro 8 Longitudes y diámetros promedio de las fibras de Caraguata

Diámetros			Diámetro promedio (mm)	Longitud promedio (cm)
Extremo (mm)	Medio (mm)	Otro extremo (mm)		
0.060	0.047	0.036	0.048	76.61

Fuente: Elaboración propia

3.2.4.2 Resistencia a tracción.

Estas pruebas también se realizaron en los laboratorios de Física de la carrera de Ingeniería Civil de nuestra UAJMS. Se tomaron 10 muestras al azar, las cuales fueron lavadas y secadas, las muestras ensayadas tienen una longitud libre de 5 centímetros¹⁸.

Se utilizaron los siguientes instrumentos:

- ✓ Micrómetro con una precisión de 0.01 mm.
- ✓ Regla milimétrica de un metro de longitud.
- ✓ Catetómetro con precisión de 0.1 mm.
- ✓ Soporte metálico.
- ✓ Pesas en gramos.
- ✓ Portapesas.
- ✓ Pinza metálica.
- ✓ Tijera.

¹⁸ Ref. Bibliográfica 20

Figura 36 Ensayo de resistencia a tracción



Fuente: Elaboración propia

Para la prueba primeramente se midió el diámetro de las fibras con el micrómetro, luego se midió los 5 centímetros de fibra con la regla milimétrica y se cortó con la tijera, posteriormente se sujetaron las fibras de un extremo en el soporte metálico y de la pinza metálica del otro, luego el portapesas se engancha en la pinza; a medida que se va poniendo las pesas en el portapesas, se va midiendo la deformación en la fibra con el catetómetro, hasta llegar a la carga de rotura.

Cuadro 9 Resistencia de las fibras de Caraguata a tracción

Valores promedio	
Longitud de aforo	5.0 cm
Diámetro	0.051 mm
Carga de rotura	71.5 gr
Esfuerzo de rotura	3540.7 kg/cm ²
Alargamiento de rotura	2.83%

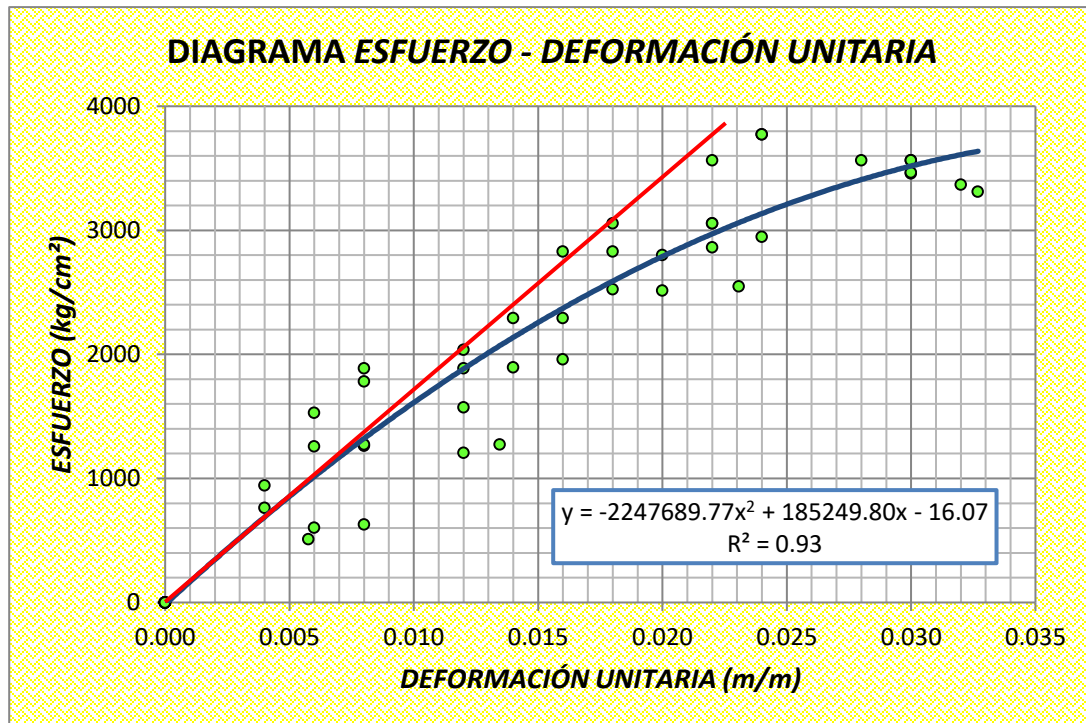
Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que estos son valores promedios, resultado de las 10 pruebas realizadas, en las cuales los diámetros de las fibras son diferentes, es por ese motivo, que hay una ligera variación entre el esfuerzo de rotura promedio y el esfuerzo que resultaría si se considera la carga y diámetro promedio.

3.2.4.3 Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad fue determinado con el diagrama esfuerzo-deformación mostrado en la figura 37, realizado con las deformaciones y esfuerzos obtenidos anteriormente.

Figura 37 Diagrama esfuerzo-deformación de las fibras de Caraguata



Fuente: Elaboración propia

Como en el ensayo de resistencia a tracción se ensayaron 10 muestras, para este apartado se tomaron las mediciones realizadas en las 10 fibras, se graficaron todos los puntos para ajustarla a una ecuación que represente en forma general el comportamiento de las fibras utilizadas en esta investigación, ya que los módulos de elasticidad de estas fibras varían una a otra, por ser estas de origen orgánico.

Debido a que la gráfica se ajusta a una ecuación parabólica, para determinar el módulo de elasticidad, se trazó una línea recta haciéndola partir del origen de coordenadas hasta donde la curva es aparentemente lineal, se hizo esto para aproximarse al módulo de elasticidad inicial de las fibras de Caraguata, se usó de la ley de Hooke.

Con una deformación unitaria de 0.005 m/m se tiene un esfuerzo de 850 kg/cm², que son los valores hasta donde la curva es más o menos recta, con estos datos se obtiene el módulo de elasticidad equivalente a 170000 kg/cm².

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{850 \text{ kg/cm}^2}{0.005 \text{ m/m}} = 170000 \text{ kg/cm}^2$$

3.2.4.4 Absorción de agua.

Estas pruebas se desarrollaron en el laboratorio de suelos y hormigones de la carrera de Ingeniería Civil de nuestra UAJMS.

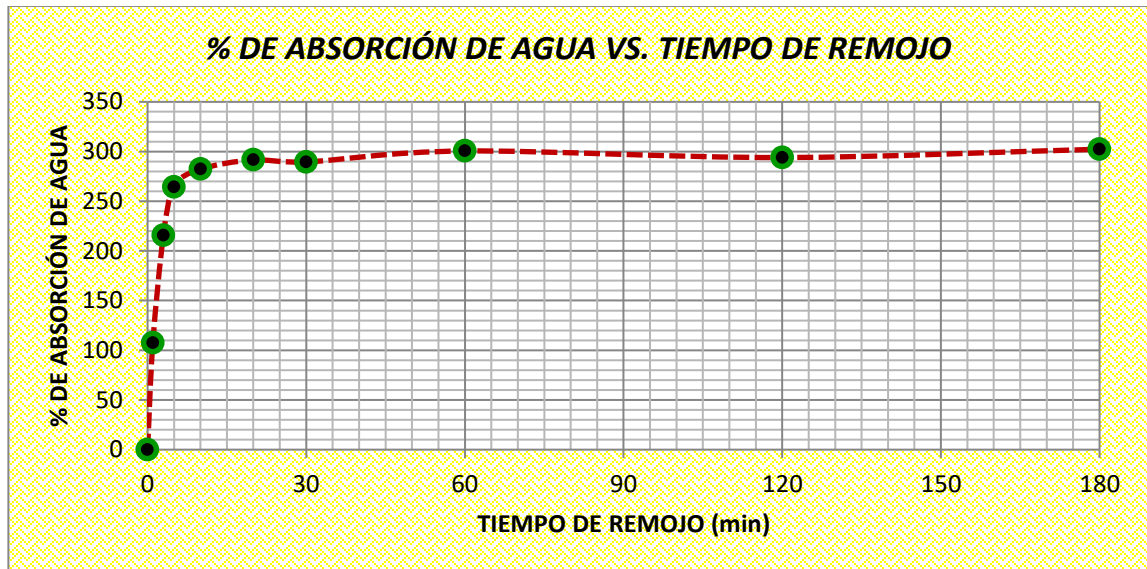
Para determinar la capacidad de absorción de agua de las fibras de Caraguata, se tomaron diferentes intervalos de tiempo en orden ascendente, para determinar el tiempo en el que las fibras se saturan completamente. Se ensayaron 5 muestras por cada intervalo de tiempo, primero se pesaron las muestras con humedad natural, después se las introdujo a un horno de secado a una temperatura de 100 °C por 24 horas para eliminar su humedad natural, pesando las fibras secas en una balanza con una precisión de 0.01 gr, luego se las sumergió en una fuente con agua por su intervalo de tiempo correspondiente, secándolas después superficialmente con una toalla y luego se las peso de nuevo. Se resume los resultados obtenidos en el cuadro 10 y en la figura 38:

Cuadro 10 Absorción de agua de las fibras de Caraguata

Tiempo de remojo (min)	% de absorción de agua en relación a la fibra seca
1	107.6
3	215.8
5	264.4
10	282.2
20	291.6
30	289.5
60	300.6
120	294.0
180	302.3

Fuente: Elaboración propia

Figura 38 Absorción de agua de las fibras de Caraguata en función al tiempo



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la gráfica, las fibras se saturan rápidamente, prácticamente después de 60 minutos las fibras ya no absorben agua. Pero lo sorprendente es la capacidad de absorción de agua de las fibras, absorben hasta 3 veces su peso seco, parámetro a tener en cuenta en el diseño del hormigón.

3.2.4.5 Densidad de las fibras.

Estas pruebas se desarrollaron en los laboratorios de física de la carrera de Ingeniería Civil de nuestra UAJMS.

Primero se sumergieron las fibras en agua por 24 horas, para estabilizar el volumen de las fibras, ya que el volumen aumenta a medida que absorbe agua, después se las secó superficialmente con una toalla. Después se pesó la fibra húmeda en una balanza con una precisión de 0.001 gramos, luego se introduce agua en una probeta de vidrio hasta su capacidad máxima y se mide la temperatura del agua con ayuda de un termómetro, posteriormente se pesa la probeta con agua en la balanza, luego se introduce las fibras húmedas en el interior de la probeta y se deja escurrir el volumen de agua desplazado por las fibras que en este caso será el mismo volumen de las fibras, como ya se tiene la masa y el volumen de las fibras se calcula la densidad con la relación masa/volumen.

Figura 39 Ensayo de densidad de las fibras de Caraguata



Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se ensayaron 10 muestras, cada muestra constituida por un grupo de fibras de cantidad variable tomadas al azar, a continuación se presenta el cuadro 11 que muestra los resultados obtenidos en el ensayo:

Cuadro 11 Densidad de las fibras de Caraguata

Nº	Peso fibra húmeda (gr)	Peso probeta + agua (gr)	Peso probeta + agua + fibra sumergida (gr)	Temperatura del agua (°C)	Densidad del agua (kg/m³)	Densidad de las fibras (kg/m³)
1	11.94	272.53	273.24	23.00	997.54	1060.51
2	24.71	272.42	273.85	23.50	997.42	1058.74
3	18.51	272.64	273.79	23.50	997.42	1063.86
4	24.87	272.68	274.26	23.00	997.54	1065.31
5	35.06	272.23	274.38	23.00	997.54	1062.56
6	38.93	272.10	274.55	23.00	997.54	1064.54
7	24.88	272.36	273.90	23.00	997.54	1063.40
8	30.04	272.28	274.13	23.00	997.54	1062.86
9	23.88	272.40	273.99	23.00	997.54	1068.42
10	20.52	272.49	273.61	23.00	997.54	1054.96
Promedio						1062.52

Fuente: Elaboración propia

3.2.4.6 Degradación de las fibras de Caraguata.

Para determinar la degradación que pudieran sufrir las fibras de Caraguata se las introdujo en el interior de una matriz cementicia como se observa en la figura 40 se sumergieron las fibras en recipientes con pasta agua/cemento=0.56 (misma relación usada en la dosificación del hormigón), por un lapso de 30 días.

Figura 40 Degradación de fibras de Caraguata



Fuente: Elaboración propia

Este ensayo se lo realizó utilizando la misma metodología usadas en el ensayo de resistencia a tracción, se usaron diez muestras las cuales fueron introducidas en pasta de cemento (agua/cemento=0.56).

Con este procedimiento se pudo hacer una comparación entre la resistencia inicial de las fibras de Caraguata, y su resistencia luego de ser introducidas a la matriz cementicia por 30 días en el cual podrían volverse quebradizas o pudrirse.

Luego de los 30 días, se observó que las fibras no presentaban ningún deterioro superficial apreciable, no se picaron, ni pudrieron, tampoco se volvieron quebradizas y su resistencia prácticamente no fue alterada como se aprecia en el cuadro 12.

Cuadro 12 Degradación de las fibras de Caraguata

Condición		Esfuerzo de rotura a tracción (kg/cm ²)
Agua/cemento = 0.56	Inicial	3540.7
	Final	3528.7

Fuente: Elaboración propia

Entonces se puede afirmar que las fibras de Caraguata no se degradan en el interior del hormigón, debido a que dichas fibras no están en contacto con el oxígeno, así lo manifiesta la Dr. Guadalupe Sierra Beltrán en su trabajo de investigación “Hormigón autorreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: Principios y aplicaciones en Ecuador”.

3.3 Resumen de propiedades de fibras Acrílicas y fibras de Caraguata.

Se puede apreciar en el cuadro 13 que ambas fibras tienen diferentes prestaciones, al ser las densidades de las fibras diferentes, la dosificación de fibras deberá hacerse por volumen, para una adecuada comparación del comportamiento de ambas fibras.

Cuadro 13 Propiedades de fibras Acrílicas y fibras de Caraguata

Propiedades	Fibras Acrílicas	Fibras de Caraguata
Densidad	1.17 gr/cm ³	1.06 gr/cm ³
Diámetro	0.008 mm	0.048 mm
Alargamiento de rotura	26%	2.8%
Resistencia a tracción	2700 - 10000 kg/cm ²	3540.7 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	140000 - 190000 kg/cm ²	170000 kg/cm ²
Absorción de agua	Ninguna	302.3 %

Fuente: Elaboración propia

Las fibras de Caraguata son 6 veces más gruesas que las Acrílicas, por lo que aparentarían ser un mejor refuerzo para el hormigón en caso de toparse con una fisura, pero como las fibras Acrílicas son de menor diámetro, estas se dispersan más ampliamente en el hormigón, lo cual es un beneficio. La resistencia de las fibras Acrílicas es similar al de las fibras de Caraguata por lo que sus comportamientos serán similares. Las fibras Acrílicas no absorben agua, a diferencia de las fibras de Caraguata, las cuales presentan una gran absorción de agua, por lo cual se las deberá introducir al hormigón saturadas para que no afecten el proceso de hidratación del cemento.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGÓN Y DISEÑOS UTILIZADOS

4.1 Consideraciones previas.

Las propiedades finales de un hormigón dependen fundamentalmente de las características de sus componentes. En el caso de los áridos puede afirmarse que no es posible conseguir un buen hormigón si la arena y la grava no son de buena calidad, por lo cual se debe buscar un adecuado banco de áridos.

Como áridos para la elaboración de hormigones, pueden emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de triturado, que reúnan las características de resistencia y durabilidad necesarias.

Las mejores arenas son las de río, ya que, salvo raras excepciones, son cuarcíticas, por lo que, su resistencia y durabilidad están garantizadas. La resistencia de la grava viene ligada a su dureza, densidad y módulo de elasticidad.

4.2 Caracterización de los materiales.

A continuación se presenta la caracterización de los materiales utilizados en el diseño del hormigón para este estudio. Con esta caracterización se procedió a determinar la dosificación del hormigón.

4.2.1 Agregado grueso.

El agregado grueso utilizado es procedente del río “La Victoria”, del cual se tiene muy buenas referencias ya que es un agregado de gran dureza, este material es de canto rodado. Para la caracterización del agregado grueso se hizo diversos ensayos en laboratorio tales como granulometría, peso específico y peso unitario.

La granulometría del agregado grueso se realizó con la serie de mallas estándar, y comparando los resultados con los límites propuestos por la norma ASTM.

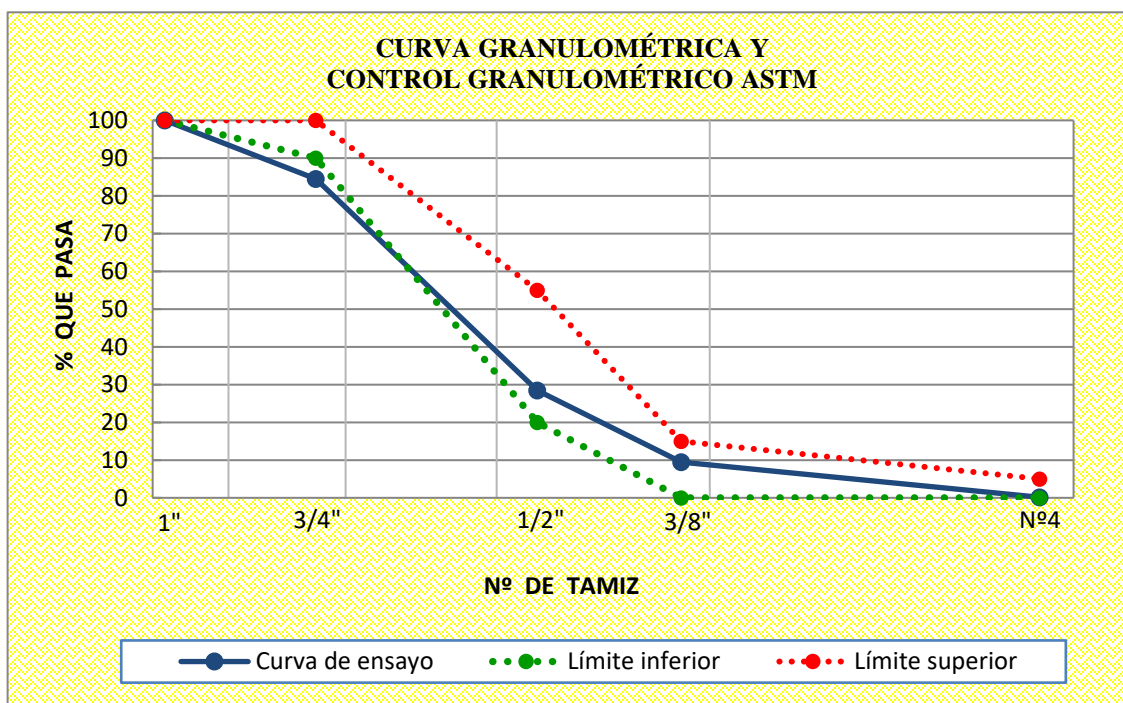
Cuadro 14 Granulometría del agregado grueso

Procedencia "La Victoria"			
Nº de Tamiz	% Que pasa el Tamiz	% Que pasa Norma ASTM	
1"	100.00	100	100
3/4"	84.52	90	100
1/2"	28.47	20	55
3/8"	9.46	0	15
Nº4	0.15	0	5

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar el agregado grueso tienen una buena distribución granulométrica, ya que se encuentra dentro de los límites propuestos por las especificaciones ASTM para conseguir buenos resultados, a excepción del porcentaje que pasa por el tamiz 3/4", pero de manera general esta distribución granulométrica conducirá a buenas características del hormigón.

Figura 41 Granulometría del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presentan las demás características del agregado grueso determinadas en laboratorio:

- Módulo de fineza = 7.06
- % de Humedad = 0.60%
- Peso específico Aparente = 2.67 gr/cm³
- Porcentaje de Absorción = 1.55%
- Peso Unitario Suelto = 1.58 gr/cm³
- Peso Unitario Compactado = 1.67 gr/cm³

4.2.2 Agregado fino.

El agregado fino utilizado también es procedente del río “La Victoria”, se tiene buenas referencias de este agregado fino, ya que este material por lo general es bien graduado y libre de polvos e impurezas, además que la mejor arena para la elaboración del hormigón es la de río.

La granulometría del agregado fino se realizó con la serie de mallas estándar, y comparando los resultados con los límites propuestos por la norma ASTM.

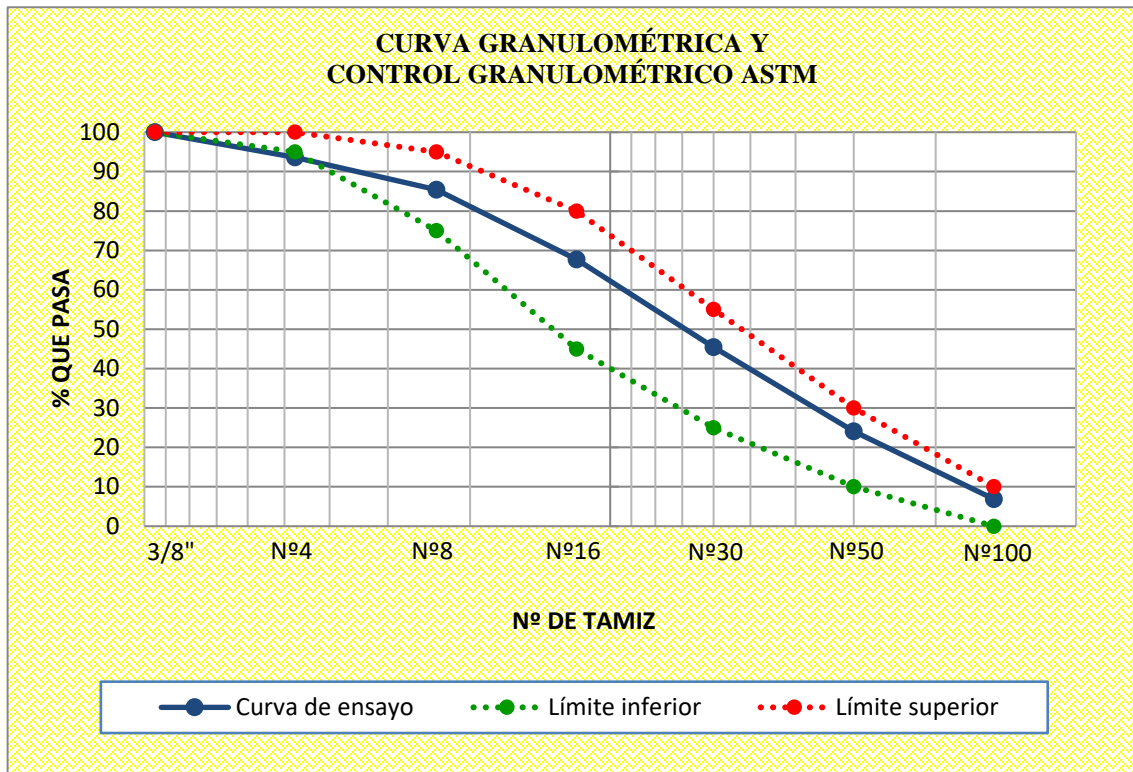
Cuadro 15 Granulometría del agregado fino

Procedencia “La Victoria”			
Nº de Tamiz	% Que pasa el tamiz	% Que pasa Norma ASTM	
3/8	100.00	100	100
Nº4	93.62	95	100
Nº8	85.44	75	95
Nº16	67.72	45	80
Nº30	45.48	25	55
Nº50	24.05	10	30
Nº100	6.88	2	10

Fuente: Elaboración propia

Se observa en el cuadro 15 que la distribución granulométrica es buena, se encuentra dentro de los límites propuestos por las especificaciones ASTM, a excepción del porcentaje que pasa por el tamiz Nº4 encontrándose muy cerca del límite inferior.

Figura 42 Granulometría del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presentan las demás características del agregado fino determinadas en laboratorio:

- Módulo de fineza = 2.77
- % de Humedad = 1.42%
- Peso específico Aparente = 2.67 gr/cm³
- Porcentaje de Absorción = 1.49%
- Peso Unitario Suelto = 1.59 gr/cm³
- Peso Unitario Compactado = 1.75 gr/cm³

4.2.3 Cemento.

El cemento Portland normal es definido por la norma ASTM C150 como el producto obtenido de la pulverización muy fina del Clinker, el cual está constituido esencialmente de silicato de calcio hidráulico, posteriormente a la calcinación se le adiciona agua y

sulfato de calcio amorfo o no tratado (yeso). La misma norma clasifica el cemento Portland normal en cinco diferentes tipos de acuerdo a las propiedades de sus compuestos principales: Tipo I, Tipo II, Tipo III, Tipo IV y Tipo V.

En esta investigación se usó cemento Portland normal Tipo I, cuya denominación es “Cemento El Puente IP-30”, por ser un material regional que se comercializa en nuestro medio y es de fácil acceso, dicho cemento presenta las siguientes características:

Cuadro 16 Características de “Cemento El Puente IP-30”

Propiedades	Valor	Norma Boliviana	Norma ASTM	Pliego Español RC-75
Pérdida al fuego	1.97%	5% max	3% max	-
Si O ₂	23.41%	-	-	-
Al ₂ O ₃	5.33%	-	-	-
Fe ₂ O ₃	2.38%	-	-	-
Ca O	60.70%	-	-	-
Mg O	4.25%	5% max	5% max	5% max
S O ₃	1.54%	3.5% max	2.5% max	4% max
Residuo insoluble	1.87%	3% max	0.75% max	3% max
Cal libre	1.39%	2.5% max	2.5% max	3% max
Residuo M-200	12%	-	-	< 15%
Tiempo de fraguado	2.5 h	Inicial: 45'	Inicial: 45'	Inicial: 45'
		Final: 10 h	Final: 10 h	Final: 10 h
Blaine	2960	2600	2800	-
R a/c	0.645	-	-	-
Fluidez	77	-	-	-
Resistencia a la compresión 3 días (kg/cm ²)	139	80	126	175
Resistencia a la compresión 7 días (kg/cm ²)	216	150	196	250
Resistencia a la compresión 28 días (kg/cm ²)	323	250	273	350
Densidad (gr/cm ³)	3.14	-	-	-

Fuente: SOBOCE

4.2.4 Agua de amasado.

Se entiende por agua de amasado, a la cantidad de agua total contenida en el hormigón fresco. Esta cantidad es utilizada para el cálculo de la relación agua/cemento y está compuesta por el agua agregada a la mezcla y la humedad superficial de los

agregados. El agua de amasado cumple una doble función en el hormigón, por un lado permite la hidratación del cemento y por el otro es indispensable para asegurar la trabajabilidad y la buena compactación del hormigón. Está prohibido el empleo de aguas ácidas, calcáreas, provenientes de minas, que contengan residuos industriales, que contengan algas, materia orgánica, humus o descargas de desagües, mismas que pueden ser dañinas para el hormigón y el acero de refuerzo.

En esta investigación siempre se utilizó agua potable de la ciudad de Tarija que cumple con las exigencias de la norma boliviana, a manera de referencia se presenta el cuadro 17 donde se muestra los parámetros máximos permitidos que debe cumplir el agua potable para ser apto para el amasado del hormigón.

Cuadro 17 Especificaciones del agua potable para el amasado del hormigón

Parámetros	Unidad	Límites máximos permitidos
Color	UCV	15
Olor		Ninguno
Sabor		Ninguno
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /l	370
Calcio	mg/l	200
Cloro residual	mg/l	1
Conductividad (22.2 °C)	μmhos/cm	1500
Cloruros	mg/l	250
Dureza total	mgCaCO ₃ /l	500
Hierro	mg/l	0.3
Índice Langelier		(-0.5) a (+0.5)
Magnesio	mg/l	150
Manganeso	mg/l	0.1
Nitratos	mg/l	45
Nitritos	mg/l	0.1
Nitrógeno amoniacal	mg/l	0.5
pH (22.2 °C)		6.5 - 9.0
Sólidos totales disueltos	mg/l	1000
Sulfatos	mg/l	400
Turbiedad	UNT	5
Coliformes totales	ufc/100 ml	0
Coliformes fecales	ufc/100 ml	0
Heterótrofos	ufc/100 ml	500

Fuente: Norma Boliviana del Hormigón Armado

4.2.5 Fibras.

4.2.5.1 Longitud de las fibras.

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz del hormigón. En este proceso de transmisión de carga es muy importante la magnitud de la unión en la interfaz de las fases matriz y fibra, es decir la longitud efectiva que permitirá una buena adherencia entre ambas fases.

Para determinar la longitud efectiva de fibras incorporadas al hormigón, algunos investigadores recomiendan que la relación de aspecto sea mayor a 100. Ya que con relaciones de aspecto menores no se lograría una buena adherencia entre la fase matriz y la fase fibra.

$$\frac{\textit{Longitud}}{\textit{Diámetro}} \geq 100$$

También algunos investigadores recomiendan como longitud efectiva de fibras 3 cm, ya que se obtuvieron buenos resultados en hormigones usando esa longitud.

Pero en nuestro caso la elección de la longitud de las fibras se la hizo tomando como parámetro a las fibras Acrílicas, las cuales ya vienen en una longitud de 2 cm, por ello se tomó esa medida también para las fibras de Caraguata, para que ambas fibras estén en igualdad de condiciones. Siguiendo las recomendaciones de los investigadores del tema, se hace notar que la relación de aspecto de ambas fibras es mayor a 100.

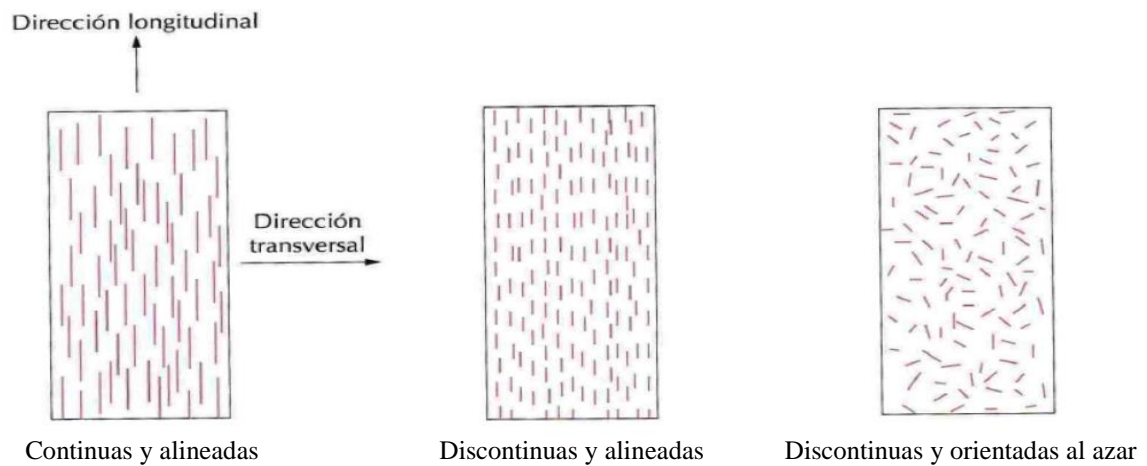
$$\begin{array}{l} \textit{Fibras Acrílicas} \\ \textit{Fibras de Caraguata} \end{array} \quad \begin{array}{l} \frac{20 \textit{ mm}}{0.008 \textit{ mm}} = 2500 \geq 100 \\ \frac{20 \textit{ mm}}{0.048 \textit{ mm}} = 416.7 \geq 100 \end{array}$$

4.2.5.2 Orientación de las fibras.

La orientación de las fibras influye radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras.

Existen dos situaciones extremas de orientación de fibras, una es la alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras y la otra es la alineación al azar. Las fibras continuas largas normalmente se alinean en forma paralela, mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear paralelamente o bien se pueden orientar al azar.

Figura 43 Orientación de las fibras



Fuente: Maria del Mar Nogueira López

En el cuadro 18 se muestra la eficiencia de la orientación de las fibras:

Cuadro 18 Eficiencia de la orientación de las fibras

Orientación de las fibras	Dirección del esfuerzo	Eficiencia del refuerzo
Todas las fibras paralelas	Paralela a las fibras	1
	Perpendicular a las fibras	0
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en un plano	Cualquier dirección en el plano de las fibras	3/8
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en el espacio	Cualquier dirección	1/5

Fuente: Maria del Mar Nogueira López

Para esta investigación las fibras serán uniformemente distribuidas en el espacio, de manera *discontinua* y *orientadas al azar* debido a que se tiene fibras cortas y no se cuenta con los mecanismos necesarios para alinear todas las fibras de forma paralela.

4.2.5.3 Dosificación de las fibras.

Las fibras se dosificaron en volumen, para lograr igualdad de condiciones en las mezclas de hormigón con ambos tipos de fibras, y así sus propiedades no estén influenciadas por la mayor cantidad de fibras que pueda presentar una frente a la otra.

Se tomó como punto de partida la dosificación en peso recomendada por el proveedor de fibras Acrílicas, con la cual se determinó la dosificación en volumen de ambos tipos de fibras, en el cuadro 19 se muestra la dosificación obtenida.

Cuadro 19 Dosificación de fibras

Fibras Acrílicas				
Dosificación en peso	kg/(m ³ H°)	0.60	0.90	1.20
Peso específico	kg/m ³	1170	1170	1170
Volumen de fibra	m ³ /(m ³ H°)	0.00051	0.00077	0.00103
Dosificación en volumen	% calculado	0.051	0.077	0.103
Fibras Acrílicas				
<i>Dosificación en volumen</i>	<i>% asumido</i>	<i>0.050</i>	<i>0.075</i>	<i>0.100</i>
Volumen de fibra	m ³ /(m ³ H°)	0.00050	0.00075	0.00100
Peso específico	kg/m ³	1170	1170	1170
Dosificación en peso	kg/(m ³ H°)	0.59	0.88	1.17
Fibras de Caraguata				
<i>Dosificación en volumen</i>	<i>% asumido</i>	<i>0.050</i>	<i>0.075</i>	<i>0.100</i>
Volumen de fibra	m ³ /(m ³ H°)	0.00050	0.00075	0.00100
Peso específico	kg/m ³	1063	1063	1063
Dosificación en peso	kg/(m ³ H°)	0.53	0.80	1.06

Fuente: Elaboración propia

Partiendo de la dosificación de fibras Acrílicas en peso y con su peso específico, se calculó el volumen de fibra por metro cúbico de hormigón, posteriormente se determinó el volumen de fibras en porcentaje, respecto a un metro cubico de hormigón, siendo este resultado la dosificación de fibras en volumen buscada.

Por comodidad se decidió trabajar la dosificación en volumen con números redondos, es por ello que no se usa la dosificación calculada, sino se usa una dosificación asumida muy próxima, que es más cómoda. Además en el laboratorio es

más sencillo trabajar las cantidades de fibras en peso por la facilidad de pesarlas en una balanza, se invirtió el proceso anterior, y partiendo de la dosificación en volumen asumida, se determina la dosificación en peso para ambas fibras.

La dosificación de fibras en volumen usada en esta investigación para inhibir fisuras por retracción plástica, está dentro los valores usuales y recomendados por los investigadores del tema, proveedores de fibras e instituciones a fines tales como el IMCyC.

4.3 Dosificación del hormigón.

El objetivo al diseñar una mezcla de hormigón consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales disponibles, para producir un hormigón que satisfaga los requisitos de desempeño bajo las condiciones particulares de su uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de hormigón bien proporcionada deberá poseer las siguientes propiedades:

- En el hormigón fresco, trabajabilidad aceptable.
- En el hormigón endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme.
- Economía.

Para llevar a cabo el diseño de la mezcla de hormigón, es necesario tener primero la caracterización de los agregados, ya que estos le dan propiedades a la mezcla. También es importante mantener una relación a/c adecuada, ya que las relaciones a/c menores a 0.4 producen pastas de consistencias entre semiplásticas y duras, que no son fácilmente moldeables en condiciones ordinarias, a menos que se les incorporen aditivos especiales. Opuestamente las mezclas con relaciones a/c mayores de 0.8 conducen a resistencias demasiado bajas para fines estructurales.

El método de dosificación utilizado fue el método ACI-211, se diseñaron muestras para alcanzar una resistencia característica de 210 kg/cm² a los 28 días de edad del hormigón, se usó un tamaño máximo de agregado grueso de 1 pulgada ya que este estudio es aplicado a estructuras superficiales, asentamiento de 3 pulgadas para conseguir una mezcla trabajable, y relación agua/cemento igual a 0.56 la cual es adecuada para hormigones convencionales y hormigones reforzados con fibras.

Para las muestras de hormigón reforzado con fibras, no se realizó ningún cambio en la dosificación del hormigón, porque de acuerdo a las recomendaciones del IMCyC cuando se agrega porcentajes bajos de fibra, no es necesario hacer ningún cambio en las proporciones de los componentes de hormigón.

En esta investigación se tendrán 7 muestras diferentes de hormigón, en las cuales la única variable será el porcentaje de fibras incorporada, se tiene una muestra de hormigón patrón sin nada de fibras, tres muestras de hormigón con fibras Acrílicas y tres muestras de hormigón con fibras de Caraguata, en porcentajes de 0.050%, 0.075% y 0.100%.

En el cuadro 20 se muestra las proporciones obtenidas en la dosificación:

Cuadro 20 Dosificación del hormigón

Ingrediente	Peso Seco (kg/m³)	
Cemento	307.14	
Agua	172.00	
Grava	1124.40	
Arena	823.62	

Cemento	Arena	Grava
1.0	2.7	3.7

Fuente: Elaboración propia

4.4 Variables consideradas.

Como se vio en el segundo capítulo las fisuras por retracción plástica, son influenciadas por distintas variables, algunas propias del hormigón sobre las que se puede intervenir y otras ajenas al hormigón me refiero a las condiciones medioambientales sobre las que no se puede intervenir o por lo menos no con facilidad.

A continuación se describen las variables consideradas en esta investigación:

- *Variable dependiente.* Fisuras en estructuras de hormigón superficiales a causa de la retracción plástica.

➤ *Variable independiente.* Adición de fibras en el hormigón, variará en los siguientes tipos y porcentajes de fibras dosificadas en volumen.

- 0% de fibras.
- 0.050% de fibras Acrílicas.
- 0.075% de fibras Acrílicas.
- 0.100% de fibras Acrílicas.
- 0.050% de fibras de Caraguata.
- 0.075% de fibras de Caraguata.
- 0.100% de fibras de Caraguata.

➤ *Constantes.* Materiales componentes del hormigón y condiciones medioambientales.

- Cantidad y tipo de cemento.
- Cantidad y tipo de áridos.
- Relación agua/cemento.
- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.
- Velocidad del viento.
- Evaporación del agua.

4.5 Cantidad de muestras.

4.5.1 Cantidad de muestras para el ensayo de resistencia a compresión.

La cantidad de muestras elaboradas en este ensayo se muestran a continuación:

Cuadro 21 *Cantidad de muestras para el ensayo de resistencia a compresión*

Tipo de Muestra	Dosificación De Fibras	Cantidad Probetas	Rotura a 7 Días	Rotura a 14 Días	Rotura a 28 Días
Hormigón Patrón	0%	18	6	6	6
Hormigón con fibras Acrílicas	0.050%	18	6	6	6
	0.075%	18	6	6	6
	0.100%	18	6	6	6
Hormigón con fibras de Caraguata	0.050%	18	6	6	6
	0.075%	18	6	6	6
	0.100%	18	6	6	6

Fuente: Elaboración propia

Esta cantidad de muestras fue elegida para tener datos confiables, con los cuales se pueda emitir criterios sin temor a equivocaciones. Teniendo un total de 126 muestras, 18 por cada tipo de mezcla y 6 por cada edad del hormigón, recordando que se romperán a 7, 14 y 28 días de edad.

4.5.2 Cantidad de muestras para el ensayo de retracción plástica.

La cantidad de muestras para el ensayo de retracción plástica se determinó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C1579, donde se muestran las experiencias obtenidas por el mismo comité que elaboró la norma, en donde usan 6 muestras por cada porcentaje de fibras con las cuales se puede emitir buenos criterios respecto a la efectividad de la adición de fibras en el hormigón para inhibir las fisuras por retracción plástica. Por ese motivo se decidió elaborar 8 muestras por cada porcentaje y tipo de fibras para tener la certeza de que se cuenta con una cantidad de muestras confiables. Se tiene 7 diferentes porcentajes de fibras, haciendo un total de 56 muestras.

Cuadro 22 Cantidad de muestras para el ensayo de retracción plástica

Tipo de Muestra	Dosificación De Fibras	Cantidad Probetas
Hormigón Patrón	0%	8
Hormigón con fibras Acrílicas	0.050%	8
	0.075%	8
	0.100%	8
Hormigón con fibras de Caraguata	0.050%	8
	0.075%	8
	0.100%	8

Fuente: Elaboración propia

Debido a que en esta prueba se ensayan grupos de 2 muestras como se explicara en el siguiente capítulo, se agrupo las muestras ensayadas como se aprecia en el cuadro 23, donde las muestras que se encuentran del mismo color pertenecen a un mismo ensayo, primero se ensayaron las muestras patrón, y posteriormente se ensayaron las muestras con un mismo porcentaje de fibras Acrílicas y de fibras de Caraguata.

Cuadro 23 Grupos de muestras para el ensayo de retracción plástica

HORMIGÓN PATRÓN	HORMIGÓN CON FIBRAS ACRÍLICAS			HORMIGÓN CON FIBRAS DE CARAGUATA		
0% - P1	0.050% - A1	0.075% - A1	0.100% - A1	0.050% - C1	0.075% - C1	0.100% - C1
0% - P2	0.050% - A2	0.075% - A2	0.100% - A2	0.050% - C2	0.075% - C2	0.100% - C2
0% - P3	0.050% - A3	0.075% - A3	0.100% - A3	0.050% - C3	0.075% - C3	0.100% - C3
0% - P4	0.050% - A4	0.075% - A4	0.100% - A4	0.050% - C4	0.075% - C4	0.100% - C4
0% - P5	0.050% - A5	0.075% - A5	0.100% - A5	0.050% - C5	0.075% - C5	0.100% - C5
0% - P6	0.050% - A6	0.075% - A6	0.100% - A6	0.050% - C6	0.075% - C6	0.100% - C6
0% - P7	0.050% - A7	0.075% - A7	0.100% - A7	0.050% - C7	0.075% - C7	0.100% - C7
0% - P8	0.050% - A8	0.075% - A8	0.100% - A8	0.050% - C8	0.075% - C8	0.100% - C8

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

ENSAYOS DE RETRACCIÓN PLÁSTICA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN

5.1 Consideraciones sobre la resistencia a compresión del hormigón.

La resistencia mecánica del hormigón frecuentemente se identifica con su resistencia a compresión, ya que ésta representa la condición de carga donde el hormigón exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos, de modo que la mayoría de las veces los elementos estructurales se diseñan con el fin de utilizar esta propiedad del hormigón, siendo un parámetro de control en la mayoría de las obras civiles.

La resistencia a compresión que potencialmente puede desarrollar el hormigón depende de la resistencia individual de los agregados, de la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales.

La incorporación de fibras poliméricas en el hormigón, en bajas proporciones alrededor de 0.10% en volumen, no tiene ningún beneficio medible sobre la resistencia a la compresión¹⁹, ya que estas fibras no poseen la rigidez suficiente para ayudar al hormigón a resistir esfuerzos de compresión, sin embargo las fibras conducen a grandes aumentos en la tenacidad del hormigón, además la presencia de fibras altera el modo de falla de los cilindros haciendo que el hormigón sea menos frágil, presentando una falla dúctil.

Considerando que las fibras poliméricas al igual que las fibras orgánicas no ayudan a resistir esfuerzos de compresión, hay que preguntarse si afectan el desempeño del hormigón al momento de resistir esfuerzos. Es por ese motivo que se decidió en esta investigación, realizar el ensayo de resistencia a compresión, además del ensayo de retracción plástica, ya que de nada serviría conseguir que el hormigón no presente fisuras por retracción plástica, si su resistencia característica de compresión se ve comprometida negativamente por la adición de las fibras.

¹⁹ Banthia, 1994

5.2 Descripción de los ensayos.

5.2.1 Procedimiento de preparación y mezclado del hormigón.

La preparación del hormigón se hizo de acuerdo a la dosificación diseñada mostrada en el capítulo anterior, el agregado grueso fue tamizado para cumplir con la especificación de tamaño máximo de agregado de 1". Se pesaron cuidadosamente en una balanza las proporciones de los agregados, el cemento y las fibras, con ayuda de fuentes y una cuchara para trasladar los materiales.

El mezclado del hormigón se lo realizó en una mezcladora eléctrica mediana de una bolsa de cemento de capacidad, el orden de incorporación de los materiales se describe a continuación:

- La totalidad del agua de amasado.
- La totalidad del agregado grueso.
- La totalidad del agregado fino.
- La totalidad del cemento.
- La totalidad de las fibras, esparcidas en toda la masa del hormigón.
- Mezclado de cinco minutos, para la correcta incorporación de las fibras en la masa del hormigón.

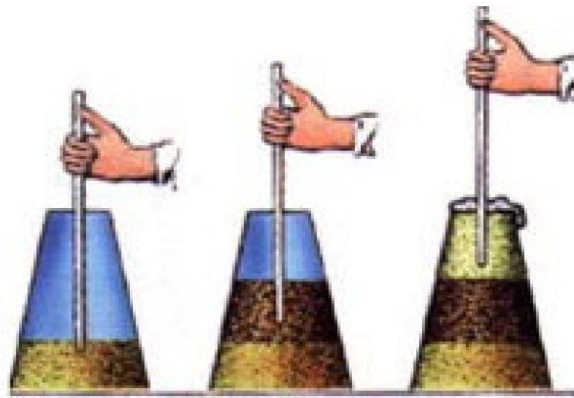
5.2.2 Ensayo de asentamiento ASTM C143.

Este ensayo es necesario para determinar la consistencia del hormigón y su trabajabilidad, la norma ASTM C143 se denomina "*Método de prueba para el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico*". Se realizó la prueba con el cono de Abrams, el cual es un cono truncado de 30 cm de alto, con una base de 20 cm de diámetro y la parte superior de 10 cm de diámetro, también se necesita una varilla recta de acero de 5/8" de diámetro, con punta redondeada en forma semiesférica y una longitud de 60 cm, por último se necesita una base sobre la que se apoye el cono.

Se describe a continuación los pasos realizados en este ensayo:

- Se humedece el molde y la placa base, situada sobre una superficie rígida no absorbente.
- Se apoya firmemente el molde sobre la base colocando y presionando con los dos pies los estribos del molde. Por ningún motivo debe moverse los pies durante el llenado del molde.
- Se llena el molde en 3 capas de igual volumen, la primera capa a una profundidad de 7 cm, la segunda hasta 16 cm y la tercera hasta el borde superior.

Figura 44 Cono de Abrams llenado en tres capas

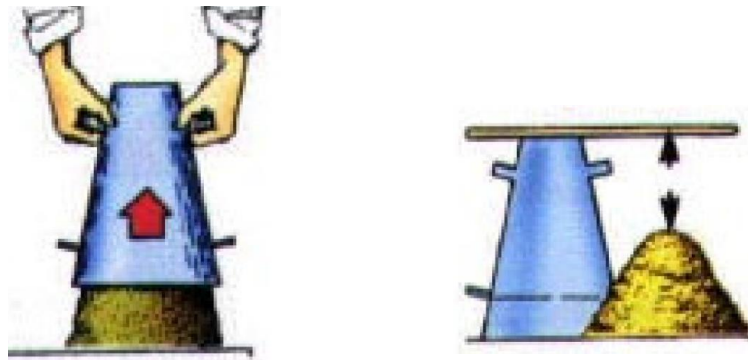


Fuente: Universidad Técnica Particular de Loja

- Se compacta cada capa en toda su profundidad con 25 penetraciones de la varilla, distribuyendo las penetraciones en toda la superficie de cada capa.
- Se compacta la segunda y tercera capa penetrando la capa anterior 25 mm y varillando desde cerca del perímetro y continuando progresivamente en forma de espiral hacia el centro del molde.
- Al compactar la última capa, se debe mantener un excedente de hormigón sobre el molde antes de comenzar el varillado, si el hormigón es insuficiente detener el varillado y colocar una cantidad representativa para mantener un exceso de hormigón sobre el molde todo el tiempo.
- Se enrasa el hormigón rodando la varilla de compactación sobre el borde superior del molde.
- Se mantiene el molde firme y se remueve el hormigón alrededor del área circundante de la base del molde para prevenir la interferencia en el momento del asentamiento del hormigón.

- Se levanta el molde con un solo movimiento vertical sin giros, por encima de los 30 cm, en un tiempo de 5 ± 2 segundos.

Figura 45 *Ensayo de asentamiento en el hormigón*



Fuente: Universidad Técnica Particular de Loja

- Se mide con una precisión de 5 mm el asentamiento, desde la parte superior del molde hasta el centro desplazado de la superficie original del espécimen. Si al levantar el cono se produce una falla por corte, es necesario descartar la prueba y realizar el ensayo con una nueva porción de mezcla, si la falla se repite, es posible que el hormigón no tenga la plasticidad necesaria o sea cohesivo para aplicar este ensayo de asentamiento.
- La prueba se debe ejecutar, desde su inicio hasta el final sin interrupciones en no más de 2.5 minutos.

Figura 46 *Medición del asentamiento en el hormigón*



Fuente: Elaboración propia

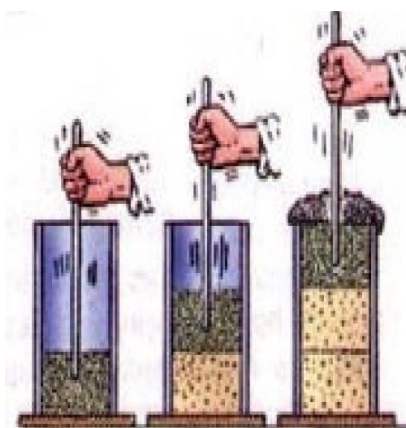
5.2.3 Elaboración y curado de muestras cilíndricas ASTM C31.

Esta práctica cubre los procedimientos necesarios para elaborar y curar muestras cilíndricas de hormigón, que puede ser compactado mediante varillado o vibración. La norma ASTM C31 se denomina “*Práctica estándar para elaborar y curar muestras cilíndricas de hormigón*”.

Para la elaboración las muestras cilíndricas se siguieron los siguientes pasos:

- Primeramente se determina el asentamiento de la mezcla.
- Se puso el molde cilíndrico de 15 cm de diámetro interior y 30 cm de alto, sobre la superficie horizontal del piso.
- Con ayuda de una cuchara se empezó a llenar el interior del molde con hormigón, moviendo la cuchara alrededor del borde del molde para asegurar la distribución del hormigón y una mínima segregación.
- Se llenó el molde en tres capas de igual volumen. En la última capa, se agregó la cantidad de hormigón suficiente para que el molde quede lleno después de la compactación.

Figura 47 Elaboración de probetas cilíndricas



Fuente: Universidad Técnica Particular de Loja

- Compactar cada capa con 25 penetraciones, con la varilla de 5/8” de diámetro, usando la punta semiesférica, distribuyendo uniformemente las penetraciones.
- Se compactó la capa inferior en todo su espesor, la segunda y tercera capa penetrando 25 mm en la capa anterior.

- Después de compactar cada capa, se golpeó los lados del molde ligeramente 10 veces con un martillo de goma para liberar las burbujas de aire que pueden quedar atrapadas, y para nivelar el hormigón.
- Se enraso el exceso de hormigón con la varilla de compactación para producir una superficie lisa y plana.
- Por último se transportó las muestras a un ambiente con superficie horizontal, donde se almacenaron hasta el día siguiente, para posteriormente desmoldarlas y sumergirlas en la piscina de curado.
- Las muestras se sumergieron completamente en el agua de la piscina de curado, hasta el día correspondiente a su rotura, recordando que las muestras se rompieron a los 7, 14 y 28 días de edad del hormigón.

5.2.4 Ensayo de resistencia a compresión ASTM C39.

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron de acuerdo a la norma ASTM C39 denominada “*Método de prueba estándar de resistencia a compresión de probetas cilíndricas de hormigón*”, en el cual se emplean cilindros de prueba de hormigón de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, elaborados en moldes metálicos.

Las probetas cilíndricas de hormigón se rompieron a diferentes edades, para poder graficar la evolución de la resistencia a medida que transcurre el tiempo, se rompieron a los 7, 14 y 28 días.

Se describe a continuación los pasos realizados en este ensayo:

- Se retiraron las probetas cilíndricas de la piscina de curado, pero manteniendo la humedad.
- Se comprobó la perpendicularidad de los cilindros respecto a su eje axial, y que sus caras extremas no presenten irregularidades.
- Se colocó en los extremos del cilindro, discos con almohadillas de neopreno, para la transmisión de carga.
- Luego se los puso en el equipo hidráulico de compresión.
- Se alineó el eje del cilindro en el centro del equipo para que la transmisión de carga sea uniforme.

- Se empezó con la transmisión de carga, haciendo uso del brazo mecánico que tiene el equipo hidráulico, manteniendo la velocidad constante.
- Cuando se produjo la falla del cilindro se anotó el valor de carga que soportaba.
- Teniendo la carga de rotura y el área del cilindro, se procedió a calcular el esfuerzo de compresión del cilindro.

Figura 48 Ensayo de resistencia a compresión



Fuente: Elaboración propia

5.2.5 Ensayo de retracción plástica ASTM C1579.

Este ensayo se usa para comparar la fisuración de superficies en paneles de hormigón reforzado con fibras, con la fisuración de superficies en paneles de control de hormigón, sujetos a restricción y pérdida de humedad que son lo suficientemente intensas como para producir fisuración. El ensayo ASTM C1579 se denomina “*Método de prueba estándar para la evaluación del agrietamiento por retracción plástica restringida del hormigón reforzado con fibras*”.

Los valores de medición obtenidos de esta prueba pueden ser utilizados para comparar el rendimiento de hormigones con diferentes proporciones de mezcla, hormigones con y sin fibras, hormigones que contienen diversas cantidades de diferentes tipos de fibras, y hormigones que contienen diversas cantidades y tipos de aditivos.

Este método intenta controlar variables atmosféricas, para cuantificar el rendimiento relativo de una mezcla de hormigón fresco. Dado que muchas otras variables como la finura de cemento, graduación del agregado, el volumen de agregado, los procedimientos de mezclado, asentamiento, contenido de aire, temperatura del hormigón y el acabado superficial puede también influir en la potencial fisuración, se deberá mantener éstos, lo más uniforme posible de mezcla a mezcla.

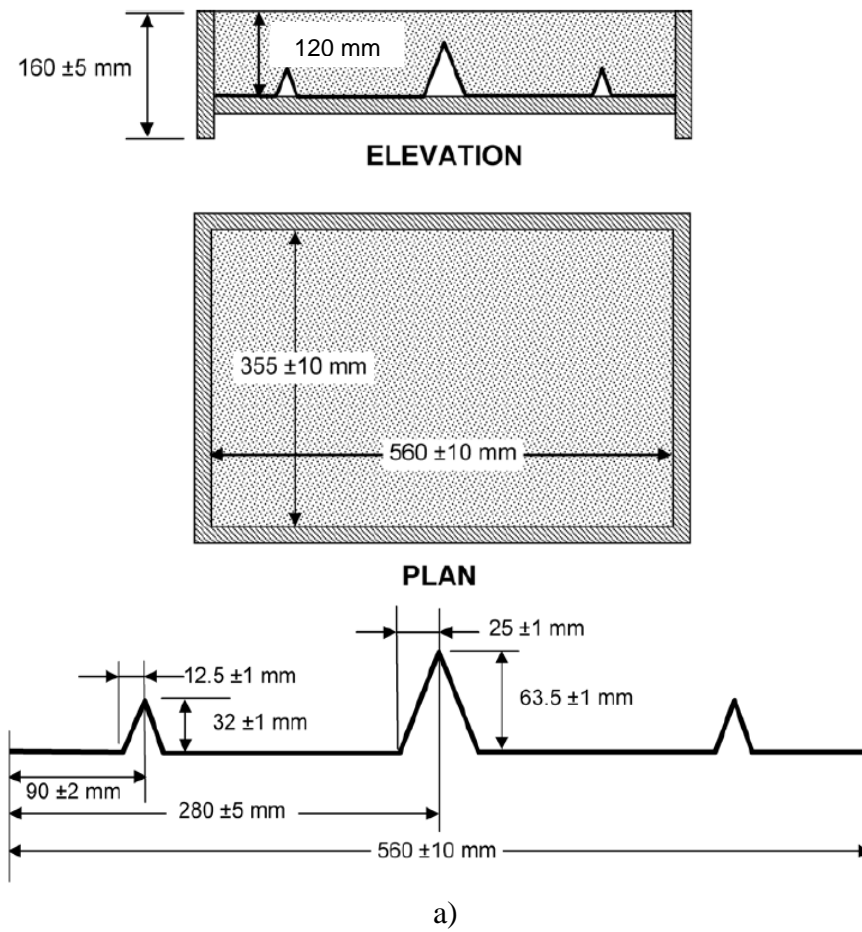
5.2.5.1 Aparatos necesarios para el ensayo.

5.2.5.1.1 Moldes.

Los moldes utilizados son rectangulares de 355 mm por 560 mm, con una profundidad de 120 mm, ya que la norma establece que la profundidad debe ser de al menos 65 mm más 2 veces el tamaño máximo de agregado grueso, en esta investigación el tamaño máximo de agregado es 1”, el molde fue fabricado con chapa metálica.

Las restricciones internas y elevador de tensión también se fabricaron de chapa metálica, como se ilustra en la figura 49, las dos restricciones miden 32 mm de alto se colocan a 90 mm hacia el interior desde cada extremo del molde, el elevador de tensión central mide 64 mm de alto y sirve como punto de iniciación para la formación de fisuras, el elevador de tensión y las restricciones van unidos a la parte inferior del molde.

Figura 49 Dimensiones de los moldes y restricciones geométricas



a)



b)

Fuente: a) ASTM C1579, b) Elaboración propia

5.2.5.1.2 Aparatos para generar condiciones medioambientales.

Para generar las condiciones medioambientales se utilizó un ventilador y un calentador. El ventilador empleado es eléctrico, de velocidad variable, tiene un diámetro de 50 cm, es capaz de alcanzar una velocidad de viento de más de 4.7 m/s en el área entera de superficie de los paneles de prueba, como lo establece la norma. El calentador utilizado funciona a gas, es de intensidad variable para poder regular la temperatura y controlar la humedad relativa del ambiente.

Figura 50 Aparatos para generar condiciones medioambientales



Ventilador eléctrico



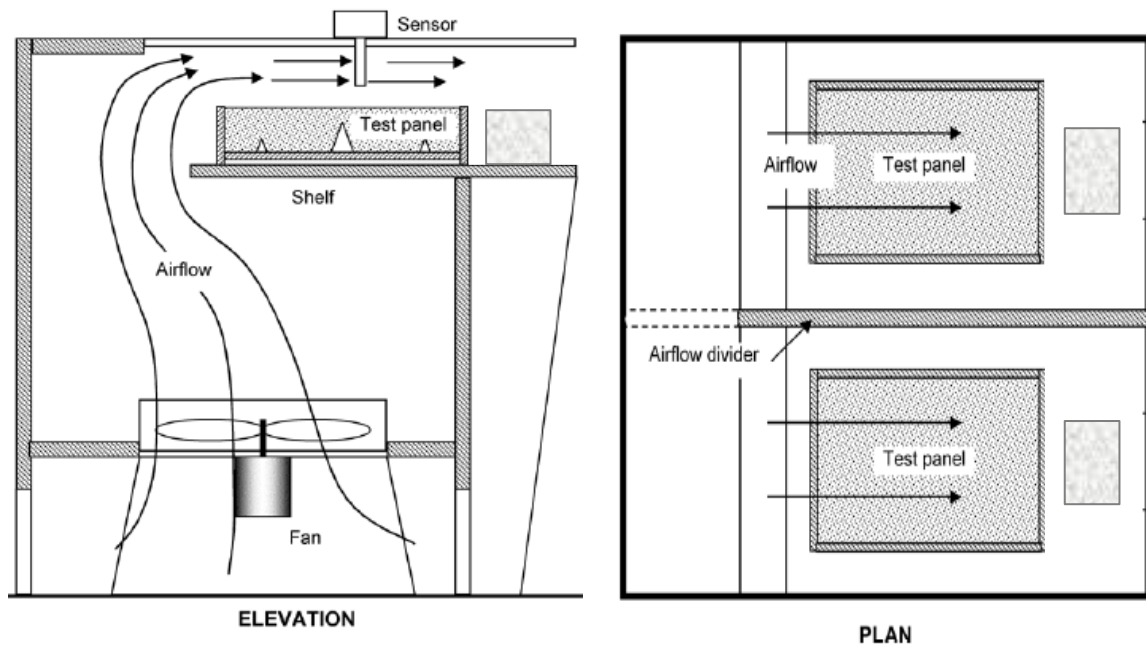
Calentador a gas

Fuente: Elaboración propia

5.2.5.1.3 Cámara ambientada.

La cámara ambientada tiene 1 m de altura, 1.2 m de largo y ancho, el esqueleto es de fierro angular, las paredes se cubrieron con trupan material rígido de textura lisa, se puso madera aglomerada como base para apoyar los moldes, por la parte superior se cubrió con vidrio para poder visualizar el proceso de fisuración en los paneles de hormigón. En el interior de la cámara se instala el calentador detrás del ventilador, así este último absorbe el aire caliente generado por el calentador y bota un flujo de aire caliente.

Figura 51 Cámara ambientada



a)



b)

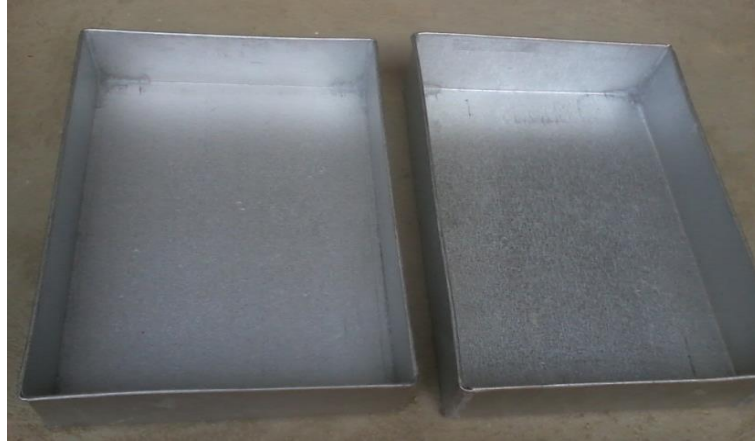
Fuente: a) ASTM C1579, b) Elaboración propia

5.2.5.1.4 Fuentes de monitoreo.

Las fuentes de monitoreo usadas son rectangulares de paredes verticales, hechas de aluminio galvanizado, tienen una sección de 38.5 cm por 26 cm, con una altura de 8 cm,

el área de exposición de las fuentes es de 0.1 m² de agua a la corriente de aire. El labio expuesto de las fuentes es de 5 mm por encima el nivel de agua, cuando inicia el ensayo.

Figura 52 Fuentes de monitoreo



Fuente: Elaboración propia

5.2.5.1.5 Aparatos para medir condiciones medioambientales.

Se midió las condiciones medioambientales con un psicrómetro y un anemómetro.

Figura 53 Calibración del psicrómetro



Fuente: Elaboración propia

La temperatura ambiente y la humedad relativa se midieron con un psicrómetro, instrumento constituido por dos termómetros, dicho instrumento fue calibrado con el psicrómetro que usa la Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares a la Navegación Aérea (AASANA). El psicrómetro en base a las lecturas de sus dos termómetros determina la temperatura ambiente y la humedad relativa, el método empleado se denomina “Método del bulbo seco y bulbo húmedo”, donde un termómetro mide la temperatura ambiente (bulbo seco) y el otro termómetro tiene su bulbo cubierto por una cinta de algodón absorbente la cual es introducida en un recipiente con agua, por lo tanto mide la temperatura a la que el ambiente se saturaría (bulbo húmedo). Estas dos lecturas y las coordenadas del lugar donde se realiza el ensayo son introducidas en un software usado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para determinar la humedad relativa, el software se denomina “SisMet”.

Figura 54 Software “SisMet”



Fuente: SENAMHI

La velocidad del flujo de aire se midió con un anemómetro de marcación digital, propiedad del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), institución que accedió al préstamo del instrumento para el desarrollo de los ensayos.

Figura 55 Anemómetro de marcación digital



Fuente: Elaboración propia

5.2.5.1.6 Comparador de fisuras.

Para medir el ancho de las fisuras, se usó un juego de galgas metálicas de diferentes espesores: 0.04, 0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.13, 0.15, 0.18, 0.20, 0.23, 0.25, 0.28, 0.30, 0.33, 0.35, 0.38, 0.40, 0.43, 0.45, 0.48, 0.50, 0.53, 0.55, 0.58, 0.60, 0.63, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80 y 0.88 mm. Cumpliendo la especificación de la norma que dice: la herramienta de medición debe ser capaz de medir un ancho de fisura de al menos 0.05 mm de la más cercana. Para verificar la precisión de las galgas metálicas se las midió con un micrómetro que tiene una precisión de 0.01 mm, con lo cual se verificó que las galgas metálicas son muy precisas.

Figura 56 Juego de galgas metálicas



Fuente: Elaboración propia

5.2.5.2 Procedimiento del ensayo.

Los pasos para realizar el ensayo retracción plástica son los siguientes:

- Primeramente se cubre la base y las paredes de los moldes metálicos con aceite desmoldante para reducir la adherencia entre el molde y el hormigón.
- Se determina el asentamiento de cada mezcla.

Figura 57 Moldes antes del ensayo



Fuente: Elaboración propia

- Se llena los moldes en una sola capa, consolidando el hormigón hasta que este nivelado con la parte superior del molde. Se enrasa cada muestra perpendicular al elevador de tensión, y se debe dar un buen acabado a la superficie.

Figura 58 Paneles de hormigón



Fuente: Elaboración propia

- Se enciende el ventilador y el calentador, que han sido preestablecidos para lograr las condiciones medioambientales que garantiza la evaporación necesaria.

Figura 59 Calentador y ventilador encendidos



Fuente: Elaboración propia

- Se coloca en la cámara ambientada un panel de hormigón reforzado con fibra y un panel de control, seguidas de cada panel se colocan las fuentes de monitoreo.

Figura 60 Paneles de hormigón en la cámara ambientada



Fuente: Elaboración propia

- Al comienzo de la prueba y a intervalos de 30 min, se registran la temperatura ambiente, humedad relativa, y la velocidad de flujo de aire, a una altura de 10 cm por encima de cada superficie de los paneles.

Figura 61 Medición de las condiciones medioambientales



Fuente: Elaboración propia

- Para la prueba, la temperatura debe mantenerse a 36 ± 3 °C, la humedad relativa a $30 \pm 10\%$, la velocidad del viento debe ser suficiente para mantener la tasa mínima de evaporación de 1 kg/m²/h. La velocidad del viento de 4,7 m/s en la mayoría de casos es suficiente para alcanzar la mínima tasa de evaporación especificada, pero una velocidad del viento superior puede ser necesaria para obtener el promedio suficiente de ancho de fisura en algunos paneles de control. Se debe medir la temperatura al 0,5 °C más cercano, humedad relativa al 1% más cercano y la velocidad del aire con una precisión de 0,1 m/s.

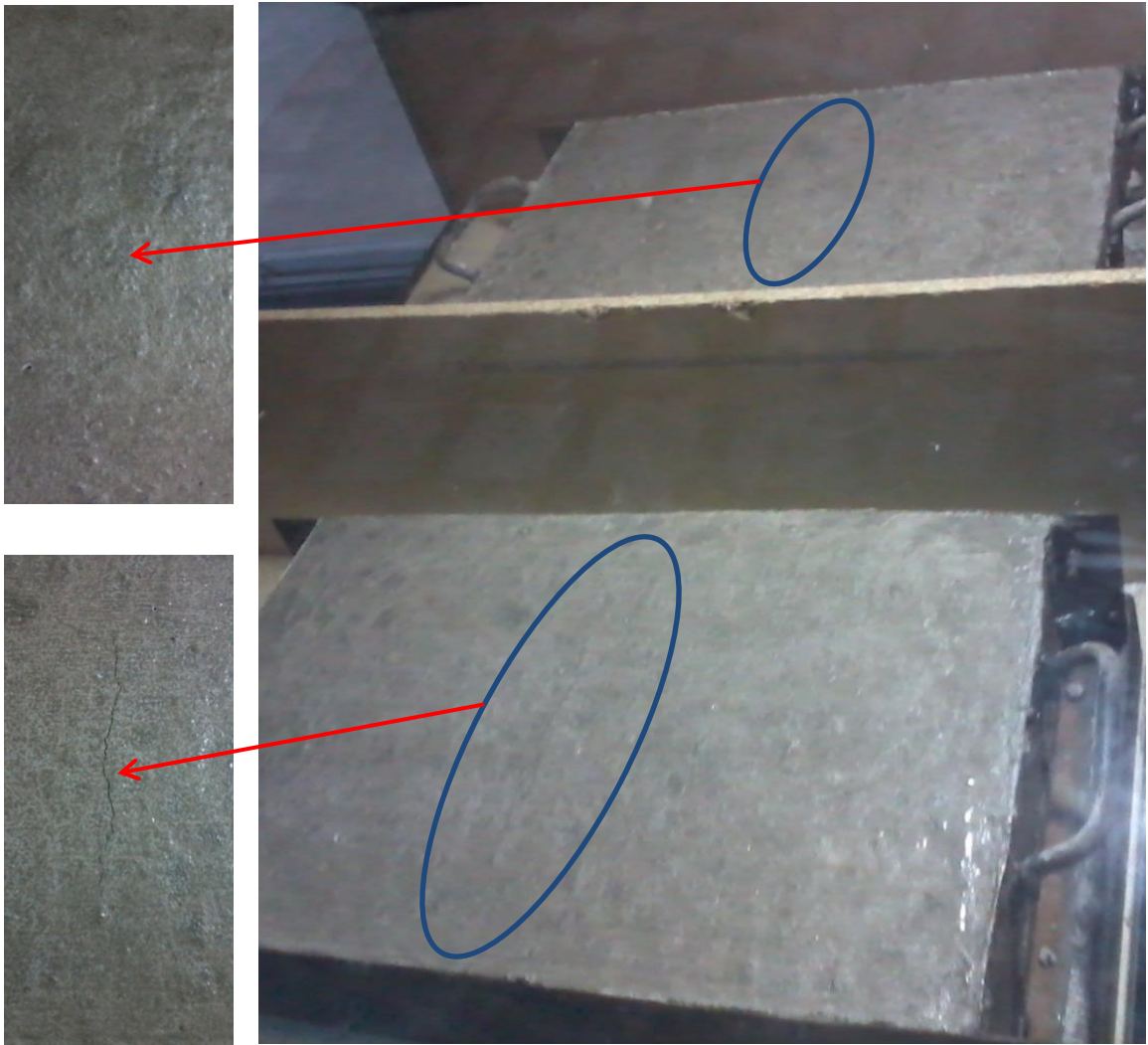
Figura 62 Velocidad de flujo de aire sobre los paneles



Fuente: Elaboración propia

- La tasa de evaporación se determinó pesando las fuentes de monitoreo cada 30 min desde el inicio de la prueba. Se anota la pérdida de masa al 5 gramos más cercano en cada pesaje. Para determinar la tasa de evaporación durante cada intervalo de tiempo, se divide la pérdida de masa entre sucesivos pesajes por la superficie del agua en el platillo y el intervalo de tiempo entre pesadas sucesivas. El ensayo no es válido si la tasa media de evaporación es menor a 1.0 kg/m²/h. Se puede colocar en las fuentes de monitoreo escalas continuas para el monitoreo periódico durante la prueba. Si no es posible, la fuente de monitoreo se debe quitar, pesar y devolverse a la corriente de aire en 15 segundos.
- El ensayo termina en el momento de fraguado final del hormigón a 6 h después del mezclado inicial, se registran las variables atmosféricas, se determina la pérdida total de agua de las fuentes de monitoreo.

Figura 63 Formación de fisuras en los paneles de hormigón



Fuente: Elaboración propia

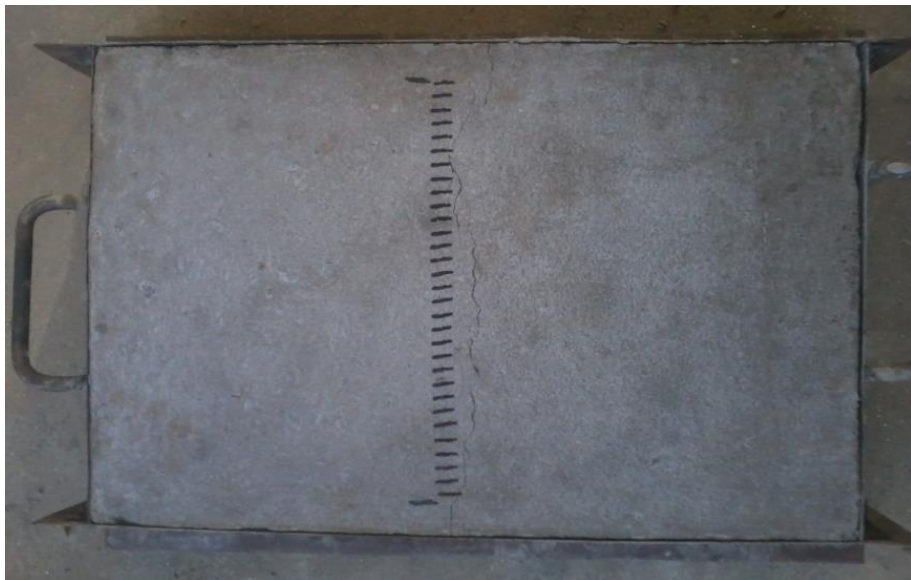
- La unidad de prueba se compone de al menos dos muestras de control y al menos dos especímenes de hormigón reforzado con fibras con las mismas proporciones de la mezcla. Un grupo de dos muestras de control tienen que ser probadas cada vez con el fin de determinar la reducción de las fisuras por retracción plástica del hormigón reforzado con fibras.

5.2.5.3 Cuantificación de fisuras.

- Se cuantifica la fisura mediante la medición del ancho de fisura en la superficie de los paneles 24 ± 2 h después del mezclado inicial.

- A fin de evitar los posibles efectos de los límites del panel sobre el ancho de la fisura, no se debe medir los anchos de fisura dentro de los 25 mm límites del panel de prueba.
- Se mide el ancho de cada fisura a lo largo de la trayectoria de fisuración sobre el elevador de tensión, en un orden progresivo desde un lado del panel al otro. Se mide el ancho de fisura al más cercano 0,1 mm a intervalos de 10 ± 1 mm a lo largo de la longitud de la fisura. Se registran todos los anchos de fisuración para calcular el ancho medio de fisura.

Figura 64 *Manera de cuantificar las fisuras*



Fuente: Elaboración propia

- Se calcula el ancho medio de fisura al más cercano 0.05 mm. Si un ancho de fisura medio de al menos 0.5 mm no es observado en los paneles de control, si un panel de control único da como ancho de fisura promedio 0,4 mm, la prueba no es válida. En ese caso se debe aumentar la tasa de evaporación para alcanzar el mínimo ancho de fisura medio, y repetir la prueba.
- Se calcula la relación de reducción de fisuras (RRF) con la siguiente expresión:

$$RRF = \left[1 - \frac{\text{Ancho de fisura del hormigón reforzado con fibras}}{\text{Ancho de fisura del hormigón de control}} \right] \times 100 \%$$

5.3 Resultados obtenidos en los ensayos.

Una vez culminados los ensayos experimentales necesarios para esta investigación, se procede a desarrollar el trabajo de gabinete, tabulando los resultados logrados, a continuación se presentan los mismos.

5.3.1 Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

Los ensayos de resistencia a compresión nos dan una pauta de cómo se modifica el comportamiento del hormigón debido a la adición de fibras, además de la incidencia de la cantidad de fibras dentro la matriz cementicia.

Cuadro 24 Resistencia a compresión a los 28 días

TIPO DE MUESTRA	DENOMINACIÓN	EDAD DEL HORMIGÓN (Días)	ASENTAMIENTO (cm)	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA (kg/cm ²)
HORMIGÓN PATRÓN	0% - P	7	8.00	141.93
		14	7.50	196.25
		28	7.50	220.49
HORMIGÓN CON FIBRAS ACRÍLICAS	0.050% - A	7	6.50	141.80
		14	6.50	187.75
		28	7.00	218.92
	0.075% - A	7	6.00	145.78
		14	6.00	193.77
		28	6.00	226.55
	0.100% - A	7	5.50	142.82
		14	5.00	189.58
		28	5.50	223.36
HORMIGÓN CON FIBRAS DE CARAGUATA	0.050% - C	7	6.50	138.77
		14	6.50	190.31
		28	6.50	220.55
	0.075% - C	7	6.00	136.45
		14	6.00	187.50
		28	6.00	218.69
	0.100% - C	7	5.00	142.03
		14	5.50	192.88
		28	5.00	223.31

Fuente: Elaboración propia

Los asentamientos de las muestras patrón cumplen el valor de diseño adoptado en la dosificación del hormigón, se observa que el asentamiento de las muestras reduce a medida que se incrementa el porcentaje de fibras para ambos tipos de fibras.

5.3.2 Resultados del ensayo de retracción plástica.

A continuación en el cuadro 25 se muestran los tiempos de inicio de fisuración para las diferentes muestras.

Cuadro 25 Tiempo de inicio de fisuración

TIPO DE MUESTRA	DENOMINACIÓN	TIEMPO PROMEDIO	
		6 HORAS	24 HORAS
HORMIGÓN PATRÓN	0% - P	105 min	1 h 45 min
HORMIGÓN CON FIBRAS ACRÍLICAS	0.050% - A	127 min	2 h 07 min
	0.075% - A	134 min	2 h 14 min
	0.100% - A	151 min	2 h 31 min
HORMIGÓN CON FIBRAS DE CARAGUATA	0.050% - C	129 min	2 h 09 min
	0.075% - C	148 min	2 h 28 min
	0.100% - C	164 min	2 h 44 min

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 26 se muestran los anchos de fisura promedio de las diferentes muestras, a las 6 horas y las 24 horas después de la elaboración del hormigón.

Cuadro 26 Ancho de fisura promedio

TIPO DE MUESTRA	DENOMINACIÓN	ANCHO DE FISURA PROMEDIO (mm)	
		6 HORAS	24 HORAS
HORMIGÓN PATRÓN	0% - P	0.60	0.66
HORMIGÓN CON FIBRAS ACRÍLICAS	0.050% - A	0.41	0.46
	0.075% - A	0.32	0.36
	0.100% - A	0.11	0.13
HORMIGÓN CON FIBRAS DE CARAGUATA	0.050% - C	0.38	0.42
	0.075% - C	0.26	0.29
	0.100% - C	0.09	0.10

Fuente: Elaboración propia

Los valores respecto a los cuales se debe emitir criterios son los anchos de fisura promedio a las 24 horas, es por ello que en el cuadro 27 se calculó la desviación estándar de estos valores, observando que prácticamente no hay variación entre las muestras de un mismo grupo, por lo que se cuenta con datos confiables.

Cuadro 27 Desviación estándar de ancho de fisura promedio a las 24 horas

TIPO DE MUESTRA	DENOMINACIÓN	ANCHO DE FISURA PROMEDIO (mm)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE ANCHO DE FISURA PROMEDIO (mm)
HORMIGÓN PATRÓN	0% - P	0.66	0.04
HORMIGÓN CON FIBRAS ACRÍLICAS	0.050% - A	0.46	0.03
	0.075% - A	0.36	0.02
	0.100% - A	0.13	0.02
HORMIGÓN CON FIBRAS DE CARAGUATA	0.050% - C	0.42	0.03
	0.075% - C	0.29	0.03
	0.100% - C	0.10	0.02

Fuente: Elaboración propia

5.4 Interpretación de los resultados obtenidos.

En conocimiento de los resultados logrados, se procede a realizar la interpretación y evaluación de los mismos.

5.4.1 Interpretación del ensayo de resistencia a compresión.

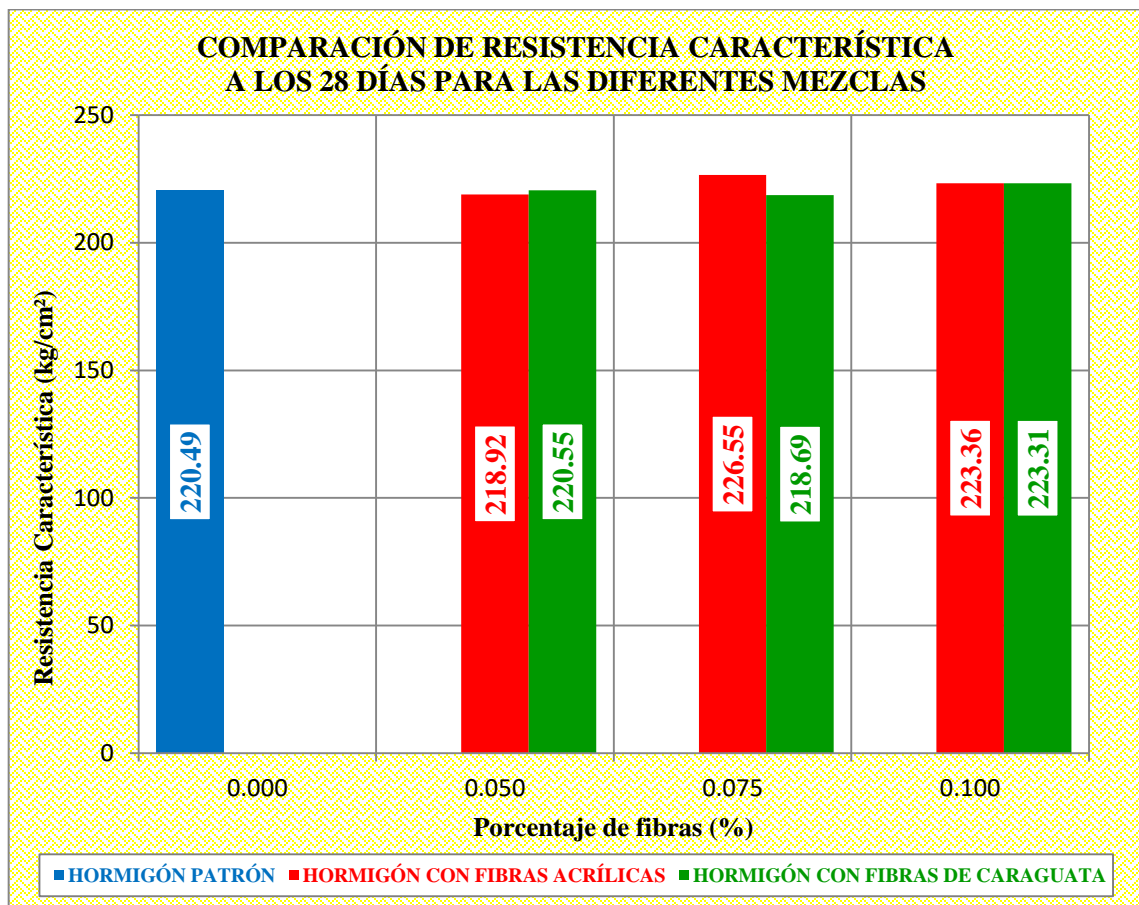
De acuerdo a los resultados obtenidos y mostrados en la figura 65 se puede apreciar que en el ensayo de resistencia a compresión, todas las muestras cumplen la resistencia de diseño de 210 kg/cm² a los 28 días de edad, por ejemplo el hormigón patrón a los 28 días de edad alcanza una resistencia de 220.49 kg/cm² superior a la de diseño, cumpliendo con la resistencia especificada para el desarrollo de esta investigación.

Las muestras de hormigón reforzadas con fibras Acrílicas, no presentan ninguna variación considerable respecto al hormigón patrón, por ejemplo para el hormigón con 0.050% de fibras Acrílicas la resistencia es ligeramente menor al hormigón patrón, y para el hormigón con 0.075% y 0.100% de fibras Acrílicas la resistencia a compresión

es ligeramente mayor. Por lo que se afirma que la adición de fibras Acrílicas en el hormigón en los porcentajes establecidos no altera la resistencia a compresión del mismo, pudiendo atribuirse las pequeñas variaciones en los resultados a los diferentes procedimientos que se realizan en el laboratorio al elaborar las probetas cilíndricas y no así al efecto de la adición de las fibras Acrílicas.

También se observa en las muestras de hormigón reforzadas con fibras de Caraguata variaciones respecto al hormigón patrón, para el hormigón reforzado con 0.075% y de fibras de Caraguata hay una reducción pequeña de su resistencia a compresión, y para el hormigón con 0.050% y 0.100% de fibras de Caraguata se tiene un incremento. La adición de fibras de Caraguata en los porcentajes establecidos, tampoco afectan de manera significativa a la resistencia a compresión del hormigón.

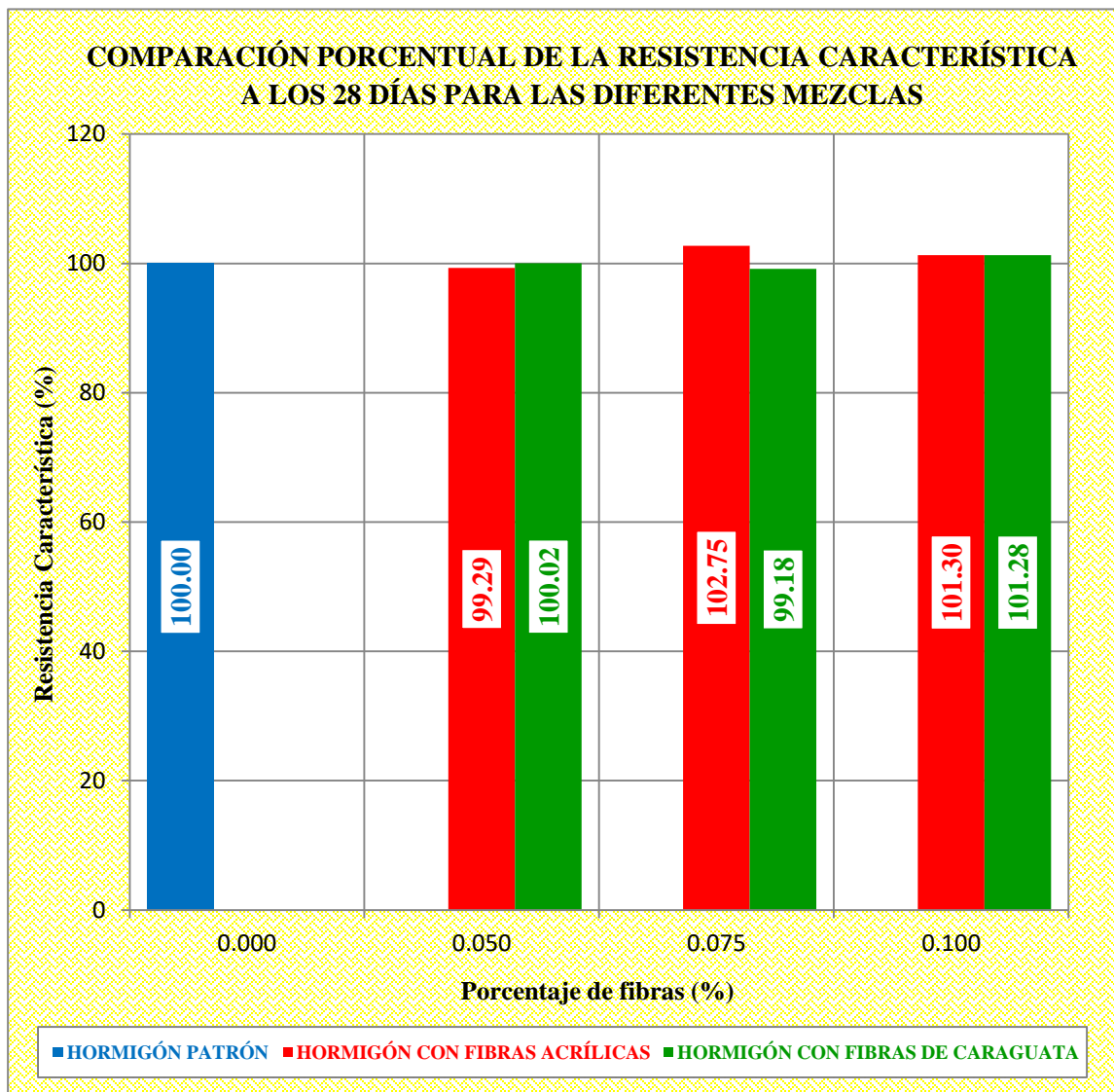
Figura 65 Resistencia a compresión para las diferentes muestras



Fuente: Elaboración propia

En la figura 66 se muestra la variación porcentual de las resistencias en las diferentes muestras de hormigón respecto a la muestra patrón. Las muestras de hormigón reforzadas con fibras Acrílicas y fibras de Caraguata confirman que las variaciones son pequeñas, tal como lo menciona el IMCyC para pequeños porcentajes de fibras. Las variaciones porcentuales de las diferentes muestras en comparación con el hormigón patrón oscilan entre 2.75% para incrementos y 0.82% para reducciones. La resistencia a compresión no se ve afectada a causa de la adición de fibras Acrílicas y fibras de Caraguata en los porcentajes utilizados para reforzar al hormigón.

Figura 66 Reducción porcentual de la resistencia a compresión



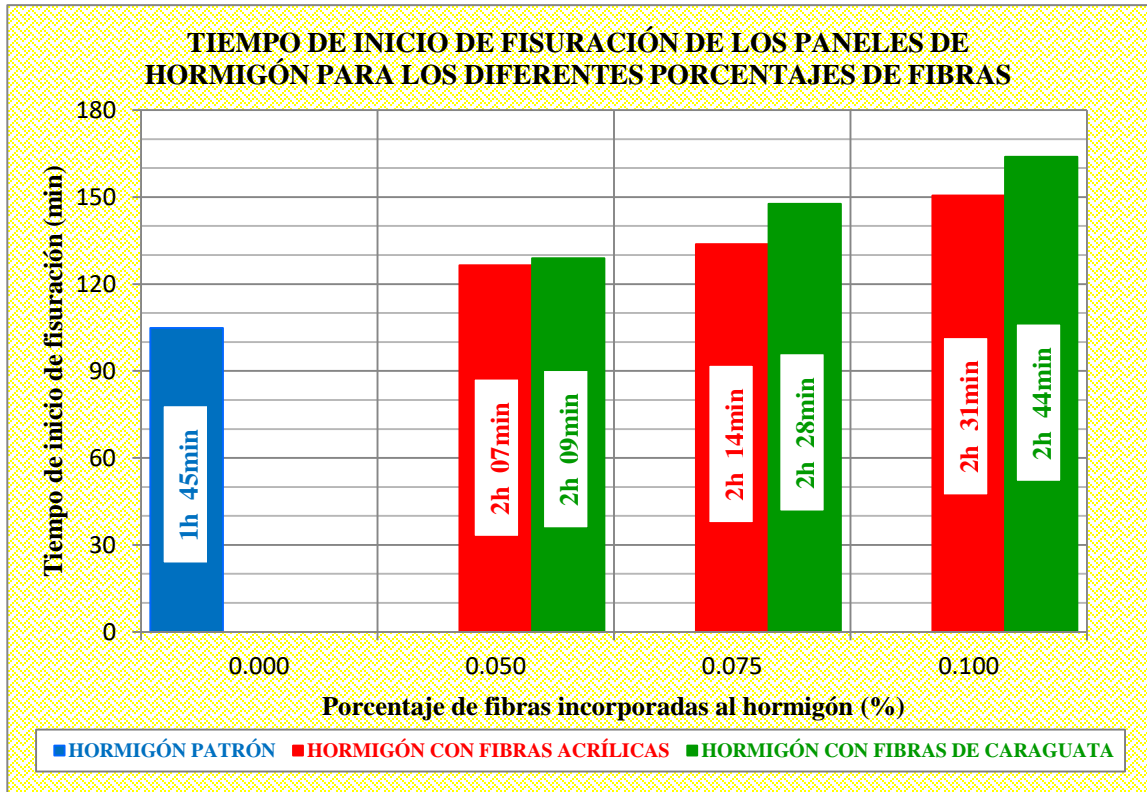
Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Interpretación del ensayo de retracción plástica.

5.4.2.1 Tiempo de inicio de fisuración.

En el transcurrir del ensayo lo primero que se observa es como las muestras empiezan a fisurarse, en la figura 67 se aprecia la manera en que inciden las fibras en el tiempo de inicio de fisuración, la muestra patrón se fisura a 1 hora 45 minutos después de la elaboración del hormigón y todas las demás muestras reforzadas con fibras retrasaron su inicio de fisuración, esto es un claro indicio de como la adición de fibras en el hormigón ayuda a controlar las fisuras por retracción plástica, ya que las fibras están impidiendo que el hormigón se fisure retrasando su inicio de fisuración, también es un indicio el hecho de que las muestras reforzadas con fibras de Caraguata retrasan más el inicio de fisuración en comparación a las fibras Acrílicas para los mismos porcentajes de fibras, por lo que podrían ser un mejor refuerzo para evitar las fisuras por retracción plástica.

Figura 67 Tiempo de inicio de fisuración



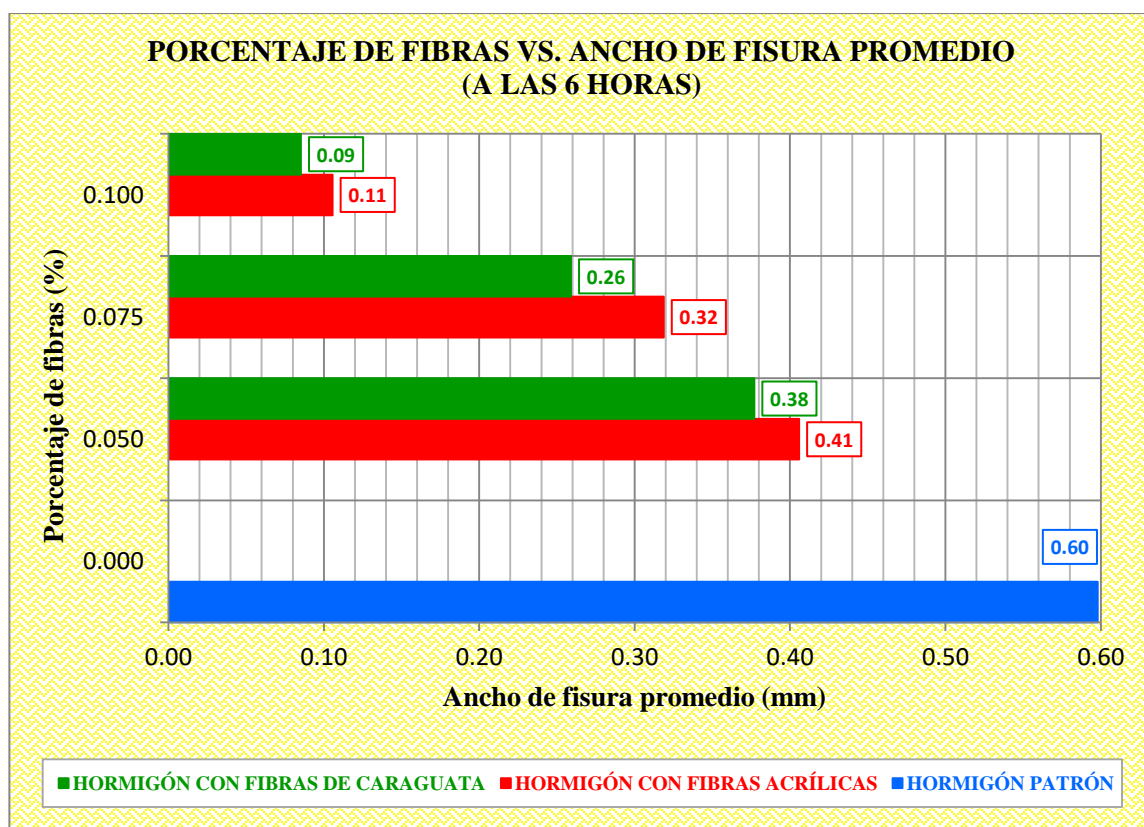
Fuente: Elaboración propia

5.4.2.2 Ancho de fisura promedio.

Los anchos de fisura promedio se midieron a las 6 horas y las 24 horas, se observa claramente que las muestras reforzadas con fibras de Caraguata son más efectivas ya que presentaron un ancho de fisura menor respecto a las muestras con fibras Acrílicas.

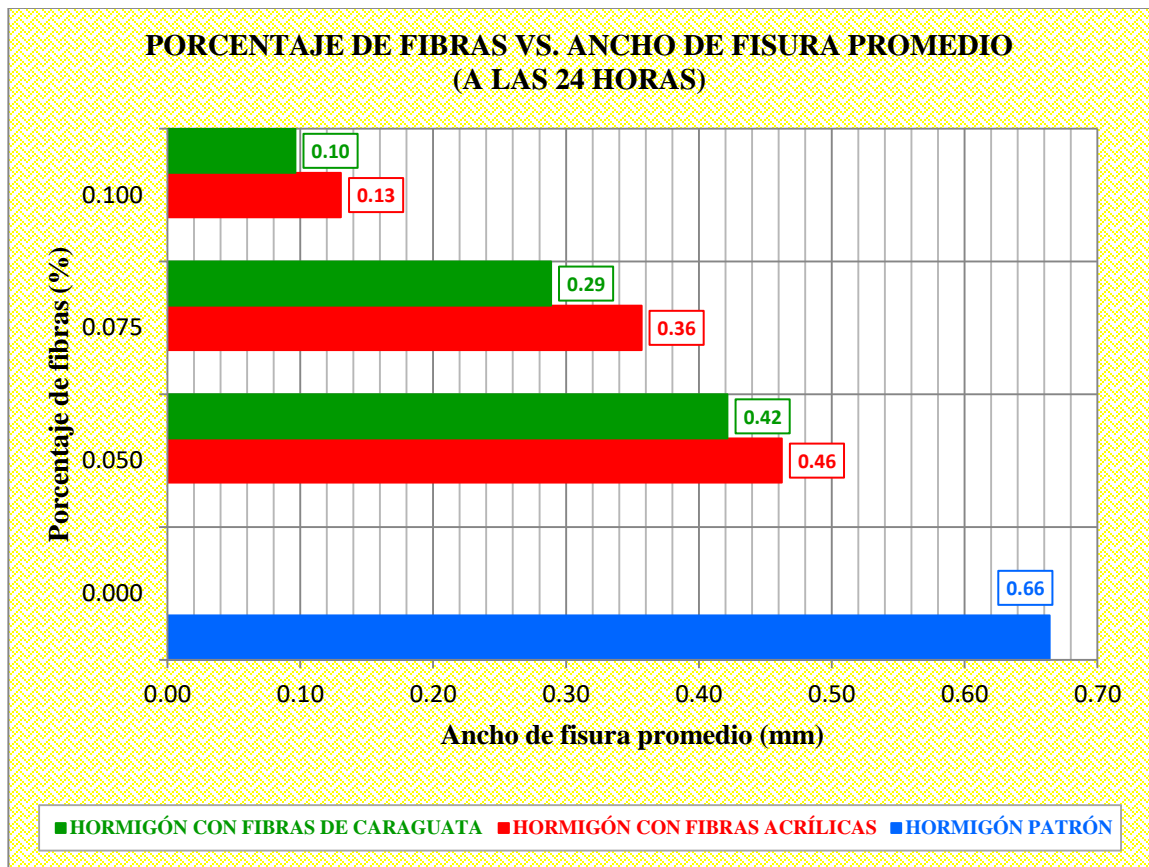
Como puede apreciarse en las figuras 68 y 69 hay una relación directa entre la cantidad de fibra adicionada al hormigón y la reducción del ancho de fisura, el patrón que sigue es que a mayor cantidad de fibras es menor el ancho de fisura, llegando a anchos de fisura despreciables con porcentajes de fibras muy bajas, en especial con el porcentaje de 0.1% con el cual el ancho de fisura para las fibras de Caraguata mide 0.10 milímetros es una décima de milímetro valor bastante alentador en comparación de la muestra patrón que es 0.66 milímetros.

Figura 68 Ancho de fisura promedio a las 6 horas



Fuente: Elaboración propia

Figura 69 Ancho de fisura promedio a las 24 horas



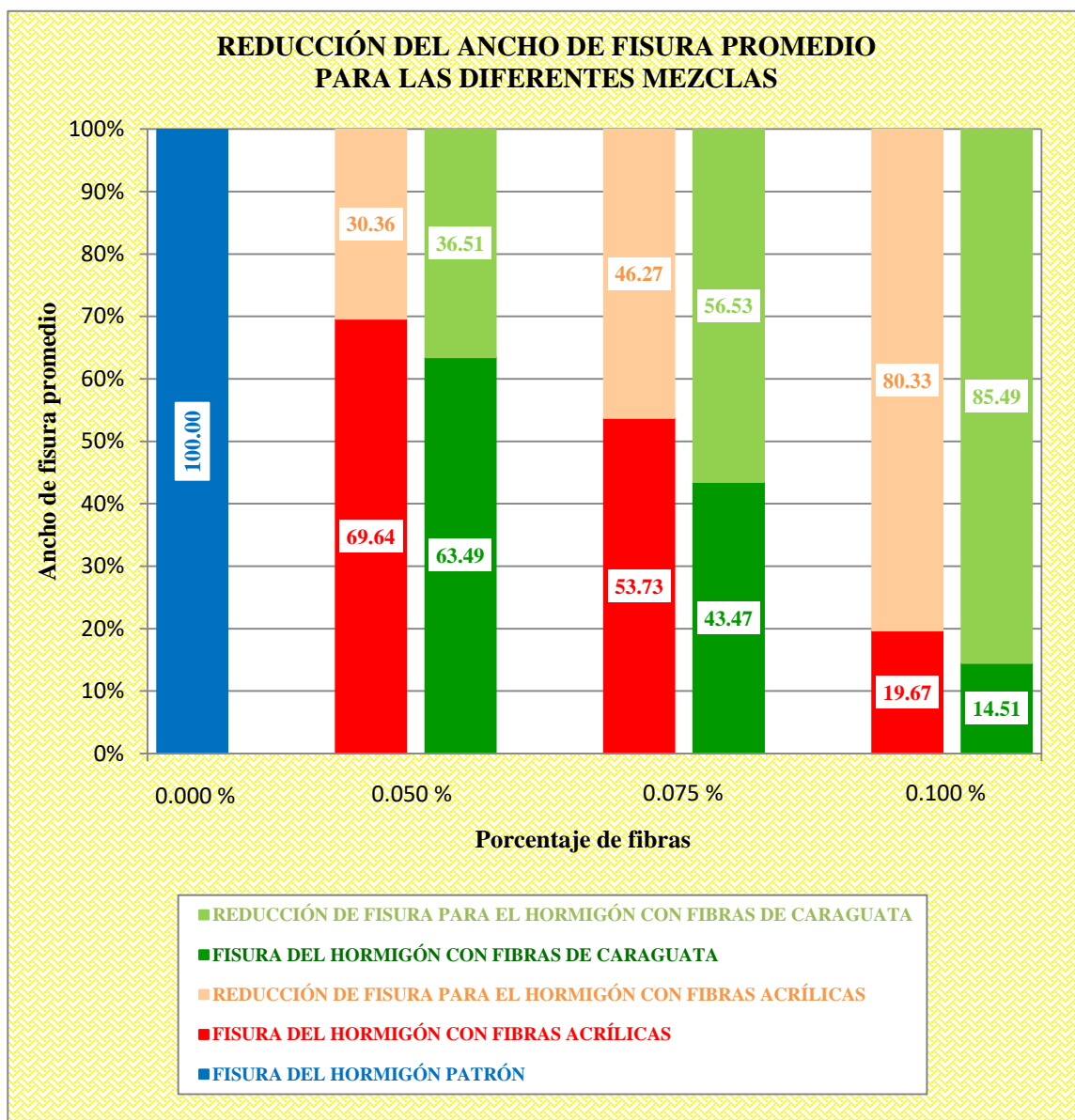
Fuente: Elaboración propia

También se puede apreciar que después de las 6 horas tiempo en el que finaliza la retracción plástica del hormigón la fisura ya no aumenta de tamaño rápidamente como lo venía haciendo, ésta solo se estabiliza hasta que llega el tiempo de medición final que es a las 24 horas.

5.4.2.3 Reducción porcentual de ancho de fisura promedio.

La reducción porcentual del ancho de fisura promedio de las muestras es muy alentadora ya que se logró reducirlo en gran medida, en la figura 70 se muestra dicha reducción destacando los resultados logrados con el porcentaje de 0.10% para ambos tipos de fibras, logrando en ambos casos reducir el ancho de fisura en más del 75% en comparación de la muestra de hormigón patrón.

Figura 70 Reducción porcentual del ancho de fisura promedio



Fuente: Elaboración propia

5.5 Aplicación.

5.5.1 Costo de fibras Acrílicas y fibras de Caraguata.

Las fibras Acrílicas se encuentran a la venta en dos presentaciones: en fardos y en bolsas hidrosolubles de 600 gramos, el costo de un kilogramo de fibras Acrílicas es de 50 bolivianos.

Debido a que las fibras de Caraguata son extraídas de plantas silvestres no se considera el costo de su cultivo, solo se considera el costo de adquisición de las fibras secas de los productores Weenhayek. Las plantas de Caraguata por lo general tienen alrededor de 18 hojas, de las cuales son aprovechables 12 hojas debido a que las restantes son pequeñas, de cada hoja se obtiene aproximadamente 25 gr de fibra, haciendo un total de 300 gr de fibra por planta. La obtención de fibra seca por lo general demora tres días, el primer día es de cosecha logrando cosechar en promedio 30 plantas por persona, el segundo día se realiza el proceso de pelado y remojo, y el último día se realiza el golpeado y secado de las fibras. Debido a que el trabajo no es sacrificado el pago por jornal es de 80 Bs, por lo tanto el costo de un kilogramo de fibras de Caraguata es de 26.67 Bs. Este costo se podría reducir con la utilización de una máquina desfibradora, ya que el almacenamiento de las fibras no presenta inconvenientes.

Realizando una comparación de costos entre ambas fibras, se observa que las fibras Acrílicas son 87.48% más costosas que las fibras de Caraguata.

5.5.2 Campo de aplicación.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, hay una diversidad de estructuras de hormigón a las cuales se incorpora fibras para reducir las fisuras causadas por el fenómeno de la retracción plástica, se analizó el incremento de costo que implica usar fibras Acrílicas y fibras de Caraguata en un metro cúbico de hormigón y en una losa alivianada. El porcentaje de adición de fibras que se consideró es de 0.10% ya que con ese porcentaje se logró mejores resultados en ambos tipos de fibras. El siguiente análisis ha sido calculado con precios del mercado tarijeño en el mes de noviembre de 2019.

Se aclara que para la elaboración de hormigones reforzados con fibras no es necesario mano de obra calificada, ya que las fibras son incorporadas al hormigón por simple dispersión en el interior de la hormigonera.

El incremento en el costo de 1 m³ de hormigón simple con adición de fibras Acrílicas es de 7.16% y con adición de fibras de Caraguata es de 3.47% más que un hormigón normal. Un hormigón reforzado con fibras Acrílicas es 3.69% más caro que un hormigón reforzado con fibras de Caraguata.

El incremento en el costo de 1 m² de losa alivianada con adición de fibras Acrílicas es de 2.05% y con adición de fibras de Caraguata es de 0.99% más que una losa alivianada normal. Una losa alivianada con fibras Acrílicas es 1.06% más cara que una losa alivianada con fibras de Caraguata.

Estos incrementos de costos pueden ser insignificantes comparados con la inhibición de fisuras por retracción plástica que se obtienen, ya que los costos de futuras reparaciones de fisuras en las estructuras no reforzadas con fibras podrían ser mayores.

A continuación se muestra el cuadro 28 donde se tiene una comparación de precios de diferentes opciones para evitar el deterioro de estructuras superficiales a causa de las fisuras por retracción plástica, los precios incluyen materiales y mano de obra:

Cuadro 28 Productos impermeabilizantes

PRODUCTO	PRECIO (Bs/m²)
Pintura Recuplast	11.60
Pintura Sika Fill	12.60
Membrana Asfáltica	90.00
Membrana Multi Seal	101.25
Poliuretano Sika Flex	14.38
Fibras Sika Fiber	4.76
Fibras Acrílicas Drymix	4.04
Fibras de Caraguata	1.96

Fuente: Elaboración propia

Por ejemplo, si se analizan estos productos en una losa alivianada de 200 m² se observa que los costos para emplear fibras son menores a los otros productos, así lo muestra el siguiente cuadro:

Cuadro 29 Comparación de costos en una losa alivianada de 200 m²

PRODUCTO	PRECIO (Bs)
Pintura Recuplast	2320.00
Membrana Asfáltica	18000.00
Fibras Acrílicas Drymix	808.00
Fibras de Caraguata	392.00

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Esta investigación fue desarrollada como una contribución académica y social, ya que busca mejorar las condiciones de vida de la población, solucionando un problema muy frecuente de las estructuras superficiales de hormigón que son las fisuras causadas por el fenómeno de la retracción plástica.

Contrastación de las hipótesis.

Hipótesis de primer grado:

Con el desarrollo de esta investigación se puede concluir que la reducción de los anchos de fisura cumplió con lo esperado, ya que los resultados superaron las expectativas a excepción de la muestra con 0.075% de fibras Acrílicas:

- 0.050% de fibras Acrílicas, reduce el ancho de fisura en 30.36% > 25%.
- 0.050% de fibras de Caraguata, reduce el ancho de fisura en 36.51% > 25%.
- 0.075% de fibras Acrílicas, reduce el ancho de fisura en 46.27% < 50%.
- 0.075% de fibras de Caraguata, reduce el ancho de fisura en 56.53% > 50%.
- 0.100% de fibras Acrílicas, reduce el ancho de fisura en 80.33% > 75%.
- 0.100% de fibras de Caraguata, reduce el ancho de fisura en 85.49% > 75%.

El refuerzo del hormigón con fibras es una buena alternativa para reducir y controlar las fisuras causadas por el fenómeno de la retracción plástica, destacando el desempeño de las fibras de Caraguata por encima de las fibras Acrílicas.

Hipótesis de segundo grado:

La incorporación de fibras Acrílicas y fibras de Caraguata en los diferentes porcentajes utilizados no afectan la resistencia a compresión del hormigón, las variaciones porcentuales de las diferentes muestras en comparación con el hormigón patrón oscilan entre 2.75% para incrementos y 0.82% para reducciones, las pequeñas variaciones no se atribuyen a la incorporación de fibras en el hormigón, sino al hecho natural de que las muestras de hormigón tienen variaciones pequeñas en su composición, es decir tienen pequeñas variaciones en la cantidad y dispersión de los agregados en su interior, por lo tanto es probable que no tengan exactamente la misma resistencia.

Al concluir esta investigación, se afirma que la mejor alternativa Técnica-Económica para inhibir las fisuras por retracción plástica es el hormigón reforzado con fibras de Caraguata, en el mayor de los porcentajes empleados en la investigación que es 0.1%, con el cual se logró reducir el ancho de las fisuras en más del 85%.

En los ensayos de retracción plástica se apreció un claro patrón de comportamiento en las muestras de hormigón, a medida que se adiciona fibras las muestras presentan un menor ancho de fisura. Debido a la reducción de fisuras, el hormigón reforzado con fibras es menos permeable que un hormigón común.

El ensayo de asentamiento para el hormigón patrón no presentó dificultades, los valores fueron similares al adoptado en la dosificación del hormigón (7.5 centímetros), para las muestras reforzadas con fibras los valores de asentamiento disminuyen a medida que se aumenta la cantidad de fibras en el hormigón, independientemente del tipo de fibra utilizado. El valor mínimo de asentamiento experimentado fue 5 centímetros tanto para las muestras reforzadas con fibras Acrílicas como para las reforzadas con fibras de Caraguata, ambas para el porcentaje de 0.1% de fibras.

Los principales factores que ocasionan fisuras en el hormigón a causa del fenómeno de la retracción plástica son: la velocidad de evaporación del agua en las superficies expuestas del hormigón, la velocidad del viento que con su poder desecante barre las superficies del hormigón (factor más determinante), la temperatura ambiente (factor más frecuente) y la humedad relativa.

Se realizó el estudio de las fibras de Caraguata determinando las condiciones climáticas y los lugares característicos del departamento de Tarija donde crecen plantas de Caraguata, también se realizó su clasificación taxonómica, se describió el procedimiento de obtención de las fibras de Caraguata, se determinó las propiedades de las fibras tales como longitud, diámetro, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, absorción de agua, densidad y degradación, concluyendo que son aptas para ser usadas como refuerzo del hormigón.

La longitud de 2 centímetros en las fibras es adecuada para los propósitos planteados, ya que se logró una buena adherencia entre las fibras y el hormigón, prueba

de ello son los resultados conseguidos reduciendo las fisuras en gran magnitud y no afectando a la trabajabilidad del hormigón, una longitud menor posiblemente no hubiera logrado reducir las fisuras en gran magnitud y una longitud mayor afectaría la trabajabilidad del hormigón.

Se identificó los procesos y procedimientos de obtención de las fibras de Caraguata, determinando que se necesitan 3 días para obtener éstas fibras, desde la recolección hasta el secado de las mismas, posteriormente ya pueden ser utilizadas para la elaboración del hormigón reforzado.

El refuerzo del hormigón con fibras tiene un amplio campo de aplicación entre los cuales se encuentran: losas alivianadas, pisos industriales, pavimentos de hormigón, tableros de puentes, pistas de aviación, hormigones lanzados, tanques de almacenamiento, piscinas, canales, alcantarillas, represas y elementos prefabricados.

En el hormigón reforzado con fibras se logran superficies acabadas iguales a las del hormigón común, siendo difícil notar que tienen fibras incorporadas en su interior.

Haciendo un análisis de costos se pudo evidenciar que usar hormigón reforzado con fibras es más conveniente que usar algún impermeabilizante a causa de las fisuras por retracción plástica, se ahorra 7.56 Bs/m² si se la compara con pintura impermeabilizante.

RECOMENDACIONES

Elaborar un hormigón reforzado con fibras no requiere mano de obra especializada, ya que las fibras se incorporan al hormigón por simple dispersión en la hormigonera, se debe tener en cuenta que para una correcta distribución de las fibras se debe mezclar el hormigón por 5 minutos después de incorporar las fibras. Las fibras Acrílicas se las incorpora directamente, las fibras de Caraguata tienen que estar completamente saturadas en agua por lo mínimo 1 hora antes de ser incorporadas al hormigón.

Se recomienda para futuras investigaciones que se usen otras longitudes de fibras para lograr mejores resultados, reduciendo el ancho de fisuras en las muestras de hormigón en mayor porcentaje, sería interesante por ejemplo usar una longitud de 1.5 centímetros, para lograr una mayor dispersión de las fibras dentro la matriz cementicia.

También se podría usar mayor porcentaje de fibras, ya que con esta investigación se logró reducir el ancho de las fisuras en más del 80%, sin embargo se podría optimizar este resultado hasta eliminar completamente las fisuras.

Se podría realizar otras investigaciones con otros tipos de fibras, que pudieran dar indicios de ser un mejor refuerzo en el hormigón para inhibir las fisuras por retracción plástica, siempre teniendo en cuenta reducir los costos al mínimo posible.

Si se utilizan las fibras de Caraguata para otra investigación, se debería realizar un estudio más preciso y detallado para determinar el módulo de elasticidad con un instrumento moderno. El módulo de elasticidad determinado en esta investigación es una aproximación ya que las fibras no tienen una relación lineal entre el esfuerzo de tracción y la deformación unitaria.

De acuerdo al ensayo realizado las fibras de Caraguata no se degradan en el interior del hormigón, ya que en un lapso de 30 días las fibras no se deterioraron y su resistencia prácticamente no cambió desde su condición inicial, por ese motivo se presume que las fibras tienen un largo periodo de vida dentro la matriz cementicia. Sin duda se tendrían que realizar estudios por un largo periodo de años para poder emitir un criterio certero acerca de la degradación de las fibras de Caraguata.