

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO DEL HORMIGÓN CON FIBRAS NATURALES DE
ABACÁ COMO COMPONENTE DE LA DOSIFICACIÓN,
CON Y SIN TRATAMIENTO QUÍMICO**

**ESTUDIO DEL HORMIGÓN CON FIBRAS NATURALES DE
ABACÁ COMO COMPONENTE DE LA DOSIFICACIÓN AL
0.5% CON TRATAMIENTO QUÍMICO NAOH**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL**

CARLOS ANDRÉS PRADO PANATA

carlos.prado@epn.edu.ec

DIRECTOR: NICOLAY BERNARDO YANCHAPANTA GOMEZ

nicolay.yanchapanta@epn.edu.ec

DMQ, SEPTIEMBRE 20

CERTIFICACIONES

Yo, Carlos Andres Prado Panata declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

CARLOS ANDRES PRADO PANATA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Carlos Andrés Prado Panata, bajo mi supervisión.

NICOLAY BERNARDO YANCHAPANTA GOMEZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

CARLOS ANDRÉS PRADO PANATA

NICOLAY BERNARDO YANCHAPANTA GOMEZ

DEDICATORIA

A mi madre, por siempre haberme apoyado y alentado en este extenso camino universitario; lleno de buenos y no tan buenos momentos, supo ser una luz de guía para mí. A las personas que llegaron en el tiempo y espacio indicado que me dejaron siempre alguna nueva enseñanza en mi vida, para poder estar hoy aquí.

Andres Prado

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo General	2
Objetivos Específicos	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 HORMIGÓN	3
1.1.1 Cemento.....	3
1.1.2 Agregados.....	3
1.2 ABACÁ	4
1.1 Historia.....	4
1.1.1 Composición.....	5
1.1 TRATAMIENTO QUÍMICO	5
1.2.1 Tratamiento alcalino	6
1.2.2 Tratamiento con silanos.....	7
1.2.3 Tratamiento por descomposición térmica.....	7
1.3 NÚMERO DE ESPECÍMENES	8
1.4 FISURACIÓN	10
1.4.1 Causas de la Fisuración en Elemento de Hormigón.....	10
1.4.2 Aplicación de cargas exteriores.....	10
1.4.3 Fisuración por contracción plástica	12
1.4.4 Fisuración por corrosión de armadura	13
1.4.5 Importancia del control de fisuras	13
1.5 INTERACCIÓN DE FIBRAS CON EL HORMIGÓN.....	14
1.6 VARIACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE ARENA EN LA DOSIFICACIÓN	15
2. METODOLOGÍA.....	16

2.1	MUESTREO DE MATERIALES.....	16
2.2	GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO	17
2.2.1	Cálculo de módulo de finura	18
2.3	CONTENIDO DE HUMEAD EN LA FIBRA	19
2.3.1	Cálculo de contenido de humedad de la fibra.....	19
2.4	TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE SODIO.....	20
2.5	ABSORCIÓN DE FIBRA TRATADA QUÍMICAMENTE	21
2.6	ENSAYO DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	23
2.6.1	Obtención de tenacidad de rotura	26
2.6.2	Alargamiento	26
2.7	DOSIFICACIÓN	26
2.7.1	Agua teórica necesaria.....	27
2.7.2	Volumen agregado grueso	28
2.7.3	Relación agua cemento.....	28
2.7.4	Corrección de humedad.....	29
2.7.5	Proporción de arena en mezcla.....	30
2.8	ELABORACIÓN DE HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA	30
2.8.1	Probetas	30
2.8.2	Cantidad y longitud de fibra	30
2.8.3	Losetas con fibra tratada.....	31
2.8.4	Vigas y cilindros con fibras de abacá	34
2.8.5	Ensayos de compresión	35
2.8.6	Ensayo a flexión	37
3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
3.1	RESULTADOS	38

3.1.1	Dosificación.....	38
3.1.2	Número de probetas.....	39
3.1.3	Propiedades mecánicas y físicas de la fibra de abacá.....	40
3.1.4	Propiedades a compresión del hormigón.....	41
3.1.5	Flexión.....	44
3.1.6	Placas o losetas.....	47
3.2	CONCLUSIONES.....	51
3.3	RECOMENDACIONES.....	52
4.	REFERENCIAS.....	54
5.	ANEXOS.....	61

RESUMEN

El presente documento consiste en analizar el comportamiento del hormigón al añadir fibra de abacá en su dosificación para reducir las fisuras que se desarrollan a temprana edad debido a la contracción plástica. La fibra es previamente tratada químicamente con hidróxido de sodio Na(OH) a una concentración del 4% para darle mayor utilidad al momento de trabajar con el hormigón. La fibra al ser un elemento vegetal presenta características físicas y mecánicas particulares que la hacen aptas para utilizarlas en este estudio.

La resistencia mínima a la que se busca llegar es de 210 kgf/cm² al mismo tiempo que se logre visualizar grietas en la superficie de las probetas tratadas. Se considerarán efectos de temperatura y velocidad de viento superficial. También, se analizará el comportamiento a flexión de elementos elaborados con esta dosificación y serán comparados con hormigón sin fibra.

ABSTRACT

This document consists of analyzing the behavior of concrete when adding abaca fiber in its dosage to reduce cracks that develop at an early age due to plastic contraction. The fiber is previously chemically treated with sodium hydroxide Na(OH) at a concentration of 4% to give it greater utility when working with concrete. The fiber, being a vegetable element, presents particular physical and mechanical characteristics that make it suitable for use in this study.

The minimum resistance to which it seeks to reach is 210 kgf/cm^2 at the same time that it is possible to visualize cracks on the surface of the treated specimens. Effects of temperature and surface wind speed will be considered. Also, the flexural behavior of elements made with this dosage will be analyzed and compared with concrete without fiber.

INTRODUCCIÓN

La estructura de hormigón es de naturaleza rígida con alta capacidad de carga, pero de naturaleza frágil. Los cambios volumétricos que ocurren en el hormigón debido a diversas razones como: la contracción, exposiciones químicas y tensiones térmicas en etapas posteriores, dan como resultado la formación de grietas en el hormigón.

Por ello, se pretende reducir las fisuras que generalmente se desarrollan a temprana edad y son apreciables un día después del vaciado o como mínimo al final de la primera semana, por lo general no son visibles hasta que la superficie humedecida está comenzando a secarse (Safiuddin et al., 2018). La aparición de fisuras en la superficie del concreto, pueden ser un problema crítico en términos de durabilidad, puesto que la presencia de estas, crea un camino libre para sustancias nocivas que puedan conducir a un deterioro prematuro y a la reducción de la vida útil de la estructura (Passuello et al., 2009).

En este estudio se analizará la retracción por secado la cual es provocada por la pérdida de humedad de la pasta de cemento, esta se puede contraer hasta un 1% (ACI 224, 2001). A partir de este tipo de contracción por secado diferencial, se produce un esfuerzo de tracción en la superficie expuesta de las estructuras de hormigón y puede resultar en la formación de fisuras (Kim & Lee, 1998).

En los últimos años, el hormigón reforzado con fibra ha recibido una atención considerable en infraestructuras de ingeniería civil como: pavimentos, puentes, túneles, losas, aeropuertos, refugios y almacenes de explosivos (Saradar et al., 2018). En este sentido, se pretende utilizar la fibra natural de abacá para reducir las fisuraciones en secciones de gran área ya que la aplicación de diferentes fibras es un factor influyente en el desarrollo de las fisuras.

Varios estudios han demostrado que la reducción del riesgo de agrietamiento que se produce en la contracción por secado se da por la adición de aditivos reductores de la contracción (SRA) y por el aumento de la resistencia a la apertura de grietas debido al uso de fibras sintéticas (Passuello et al., 2009). Sin embargo, estas pueden llegar a ser caras, por esto la aplicación de las fibras naturales representan una opción más económica y con buenas propiedades como ya se han demostrado en varios estudios previos.

El abacá al ser un material orgánico requiere un tratamiento que evite su biodegradación natural. El tratamiento de las fibras naturales, le confiere cierta aspereza logrando una mejor adherencia

entre la fibra tratada y la matriz cementante. Las placas deben seguir el lineamiento de la granulometría para obtener una resistencia mínima de 210 kgf/cm^2 , con su respectiva adición de fibra natural, con tratamiento y sin tratamiento para tener un campo más amplio de comparación de resultados. Cuando se considera un número de muestras igual a 3, se debe tomar en cuenta el rango aceptable de resistencias individuales (ASTM C39/C39M, 2021). Para simular el proceso de contracción del hormigón se utilizará una cámara de contención que proveerá temperatura constante y viento permanente.

Objetivo General

Reducir las fisuras desarrolladas en el hormigón a temprana edad producidas por su contracción, utilizando fibras naturales de abacá con tratamiento químico de hidróxido de sodio (NaOH) al 0.5% del agregado grueso, manteniendo una resistencia aceptable a la compresión de al menos (210 kgf/cm^2).

Objetivos Específicos

- Determinar una dosificación para el hormigón con el 0.5% de fibra de abacá, que permita alcanzar una resistencia mínima de 210 Kgf/cm^2 .
- Obtener las propiedades físico-mecánicas de la fibra de abacá con tratamiento de hidróxido de sodio y sin tratamiento.
- Evaluar de manera comparativa los resultados obtenidos de los ensayos para vigas y cilindros de hormigón con el 0.5% de fibra de abacá con tratamiento químico (NaOH).
- Diferenciar el comportamiento mecánico de un hormigón simple expuesto a esfuerzos de compresión y flexión, en comparación al hormigón con reforzamiento de fibra de abacá tratada.
- Medir y evaluar la disminución de fisuras producida después de haber inducido el proceso de secado en placas de hormigón reforzado con fibras de abacá al 0.5%.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 HORMIGÓN

El hormigón seguido del agua, es el segundo material más usado, sobre el cual se ha desarrollado la sociedad moderna (Brunatti, 2014). Resulta de una combinación de generalmente cuatro componentes, agregado fino, agregado grueso, cemento y agua. Los agregados ocupan entre el 65 y 75 por ciento del volumen de la mezcla endurecida, lo demás, es una combinación de vacíos de aire y pasta cementosa seca (Darwin et al., 2016). Mientras mayor sea la densidad de los agregados en la dosificación, disminuyen los costos y aumenta la durabilidad. Al mismo tiempo se busca que el hormigón tenga una buena resistencia y soporte las inclemencias de la intemperie.

1.1.1 Cemento

Es un conglomerante cuyas propiedades adhesivas y cohesivas permite unir fragmentos de otros ingredientes que otorga resistencia y durabilidad. Dentro de la variedad de cementos, el que se emplea en la elaboración del hormigón es el cemento hidráulico y dentro de estos, el cemento Portland. Su activación consiste en una reacción química denominada hidratación, lo que produce el fraguado y endurecimiento gradualmente. Principalmente se encuentra compuesto de silicatos de calcio y aluminio (Darwin et al., 2016).

El cemento Portland de mayor uso en la construcción es el normal tipo I. Los hormigones que se elaboran a partir de este cemento requieren generalmente una semana o dos para alcanzar una resistencia suficiente para aplicar carga. Luego de 28 días se consigue la resistencia de diseño y a partir de ahí continúa ganando resistencia, pero en un ritmo decreciente (Darwin et al., 2016).

1.1.2 Agregados

Son materiales pétreos inertes extraídos de canteras o meandros de ríos, estos son extraídos con métodos como el arranque mecánico, barrenado o voladura (Valle et al., 2012). El agregado fino generalmente se lo obtiene de arena natural y es aquel que pasas por el tamiz N.º 4. Al material de mayor grosor que este se lo clasifica como agregado grueso. Mediante un proceso de cribado la arena es separada en dos o tres grupos, mientras que la grava en varios, para obtener una gradación más precisa. (Darwin et al., 2016). Es importante que los agregados tengan buena resistencia y que su superficie esté libre de impurezas, para una correcta adherencia con la pasta de cemento.

1.2 ABACÁ

1.1 HISTORIA

La planta abacá es originaria de Filipinas, en su pseudotallo produce una fibra natural que se cosecha por ser conocida como la más resistente del mundo. Las fibras de abacá presentan propiedades como flexibilidad, durabilidad, resistencia a la salinidad y resistencia mecánica a la tracción. Además, se considera que tiene durabilidad bajo el agua, debido a que resiste la velocidad de descomposición del agua. (Armecin et al., 2014).

El pseudotallo está compuesto de tallos miden cerca de 5 cm de diámetro que se agrupan para formar anillos envolviendo a la planta (Britannica, 2014). Las fibras de abaca a pesar de ser clasificada como una fibra de hoja, no es extraída de ahí como tal, sino del pseudotallo (Waller et al., 2019). En la actualidad, no se han podido encontrar mediciones exactas en cuanto a la resistencia de tracción que posee, pero existen informes de medición a la tracción de dichas fibras, en donde los resultados afirman que posee alta resistencia. La resistencia a la tracción de los haces de fibras tiene un rango aproximado de 600 a 900 MPa (Cai et al., 2015)

Debido a las propiedades que poseen las fibras de abacá son utilizadas en varios ámbitos, fabricación de herramientas marinas, papel y producción de textiles. Las fibras de abacá han mostrado buenos resultados como reemplazo para materiales a base de combustibles fósiles, lo que la hace amigable con el medio ambiente. Actualmente el uso de la fibra está tomando fuerza en el sector automotriz y la industria de la construcción. Cabe recalcar que las hebras de la fibra tienen en promedio de 1 a 3 metros de longitud, que depende en gran medida del tipo de procesado (Britannica, 2014).

El tronco del árbol es cortado por completo para luego empezar con el proceso de separación de capas, que contiene los tallos. Para esta fibra existen cinco colores distintos asociados a su calidad. Las capas son extraídas en forma de láminas muy finas y alargadas que posteriormente pasan a una máquina rotatoria. Esta se encarga de extraer el exceso de corteza del árbol y conservar la fibra, finalmente es lavada y secada. (Quevedo, D. 2019)

La fibra natural, según su fuente se divide en tres grupos, la fibra animal como la seda o la lana, la fibra mineral como asbestos y la fibra vegetal (Maya et al., 2008). Esta última se puede extraer en función de la localización de la fibra en la planta, esto es, acorde a su tallo, semillas o fruto.

Con respecto al tipo de extracción que se dé se podrá agrupar a la fibra dentro de la categoría de blanda o dura.

1.1.1 Composición

Se componen principalmente de celulosa que se presenta en forma de microfibras cristalinas distribuidas y alineadas en todo el eje longitudinal de la fibra, seguido de hemicelulosa, lignina, entre otros. La celulosa brinda características de estabilidad y resistencia, mientras que la lignina proporciona resistencia a la tracción de los tejidos, protección bacteriana y fúngica de forma natural (da Costa et al., 2014). Específicamente el abacá tiene un contenido de lignina superior al 15% (fao. ND). Este conjunto de elementos lo convierten en un material ligero, resistente y capaz de soportar agentes oxidantes pero que puede verse afectada al exponerse a ácidos fuertes (Vijak, 2013).

Si se compara con otras fibras, se puede observar que el abacá presenta mejoras mecánicas significativas:

Tabla 1. Propiedades mecánicas de algunas fibras vegetales.

Propiedades	Cáñamo	Coco
Densidad (g/cm ³)	1.48	1.25
Resistencia a la tracción (MPa)	550-700	220
Módulo de Young E (GPa)	70	6
Alargamiento (%)	1.6	15-25

Fuente: (da Costa et al., 2014).

1.1 TRATAMIENTO QUÍMICO

Todo elemento extraído de la naturaleza está sujeto a una fase de degradación, esta puede ocurrir en presencia de oxígeno o sin oxígeno, descomponiendo la fibra a CO₂, agua, sales minerales y biomasa (Gómez et al., 2013). Existen varios tipos de métodos ampliamente usados para tratar químicamente a una fibra, ya sea para mejorar su apariencia o su resistencia. El propósito es que al mezclarla para dar forma un sistema heterogéneo de dos fases (hormigón) la fibra no se vea afectada, conserve sus propiedades o incluso estas sean potenciadas. (Acevedo et al., 2021).

Una de las principales desventajas de la fibra vegetal como refuerzo es su alta absorción de humedad, además, la baja compatibilidad existente entre esta y el elemento a ser reforzado. (Faruk et al., 2012). Para contrarrestar el efecto de absorción de agua se puede reducir la polaridad de las moléculas de celulosa. Al eliminar la capa superficial de la fibra y se expone su estructura interna, por tanto, una mejor superficie de adhesión. (Albinante, S. 2012).

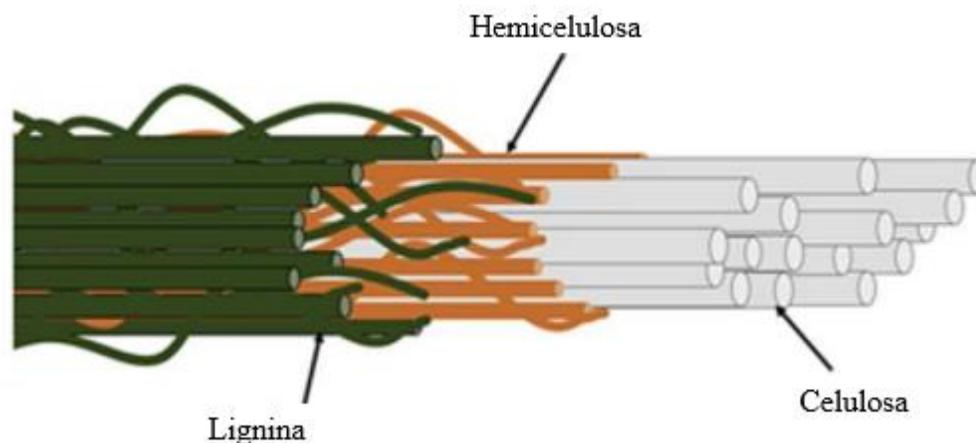


Figura 1. Componentes importantes de la fibra natural.

Fuente: (Asyraf et al., 2022).

1.2.1 Tratamiento alcalino

Mercerización, es un proceso descubierto por el químico John Mercer. Mientras filtraba una solución química a través de un paño de algodón notó algunos cambios en el tejido, lo cual permitió su estudio para una posterior estandarización del proceso. El método consiste en tratar los hilos de algodón con una solución de hidróxido de sodio en frío. En el proceso, las fibras de algodón se hinchan y sus propiedades físicas mejoran. Entre estos beneficios se encuentra: Incremento de la resistencia de 15 a 25%, aumento del brillo, mayor afinidad a los tintes y otros acabados químicos (Kendra, S. 2014).

El tratamiento alcalino consiste en colocar a las fibras en una solución acuosa de base fuerte. Con esto, mejora la apariencia superficial, la estabilidad térmica, el módulo de elasticidad aumenta un 25% a la vez que la rigidez, además que elimina sustancias indeseables como lignina, cera y alcoholes. Es un proceso económico y sencillo que deriva en su gran aplicación en varios procesos. (Acuña, J. 2007). Es decir, el método logra la ruptura de los enlaces de

hidrogeno en la estructura de la fibra, lo que aumenta la rugosidad en la superficie. (Faruk et al., 2012).

1.2.2 Tratamiento con silanos

Es un compuesto químico derivado del silicio, que usa agentes de acoplamiento el cual es un aditivo. Esto brinda estabilidad a la unión, generalmente entre un compuesto orgánico y un inorgánico. Esta interacción permite desarrollar un efecto Van der Waals con la matriz del compuesto de hormigón. Esta interacción genera un grupo hidrofílico capaz de reaccionar con la fibra, lo cual beneficia la unión fibra matriz (Velásquez et al., 2016).

Este tratamiento busca reducir la cantidad de grupos hidroxilos presente en la fibra ajustando el pH. De modo que los agentes de acoplamiento presentes logran adoptar propiedades hidrofílicas en la fibra. Este de tratamiento aumenta las propiedades mecánicas como tracción, resistencia al desgarro y la vida útil. La contraparte es que resulta un tratamiento costoso (Faruk et al., 2012).

1.2.3 Tratamiento por descomposición térmica

Este tipo de tratamiento químico reduce el porcentaje de lignina, hemicelulosa y celulosa en la fibra. Específicamente, en el proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, la hemicelulosa comienza su descomposición térmica cerca de los 180 °C, por otro lado, la celulosa comienza a degradarse a los 240 °C y finalmente la lignina a los 280 °C. A pesar de que esto valores de temperatura se los determina aislando cada componente, es posible analizar el comportamiento térmico mediante un análisis global, en el cual no se consideren reacciones secundarias formadas durante la degradación (Jiménez et al., 2009).

El tratamiento más usado dentro de este campo es mediante vapor. La fibra es sometida a altas temperaturas y presión para lograr una expansión súbita con lo que logra limpiar la superficie de la fibra de sustancias no deseadas. Lo que debilita su rendimiento mecánico. (Acevedo et al., 2021).

1.3 NÚMERO DE ESPECÍMENES

Cada ensayo o método de elaboración está sujeta a variables que en muchos casos son complejas de controlar, como el clima, la gravedad, la presión, etc. Lo que conlleva a la incertidumbre dentro de la reproducción. Para determinar el número necesario de probetas a ensayar dentro de cada grupo, es necesario realizar una recopilación de términos y definiciones estadísticas importantes. Se debe garantizar una cantidad mínima para asegurar que las propiedades ensayadas en laboratorio sean correctas.

Cuando se tiene muestras grandes de una población es posible calcular los intervalos de confianza con una distribución normal Z. Sin embargo, cuando la muestra es pequeña no existen métodos precisos para determinar estos intervalos. Pero, cuando la distribución de la población es aproximadamente normal, se puede aplicar una distribución de probabilidad conocida como t Student o distribución t. La distribución de t difiere de la de Z ya que la primera depende dos cantidades, \bar{X} y S^2 . Además, la varianza S^2 depende también del tamaño de la muestra (Walpole et al., 2012).

- Población: Es el conjunto completo de elementos o resultados de cierta información que se busca.
- Muestra aleatoria simple: Es un subconjunto de la población, de tamaño n, en el que cada agrupación n de la población tiene la misma probabilidad de formar la muestra.
- Desviación estándar: Se prepreña con la letra S y es una media que permite conocer que tan dispersos se encuentran los datos alrededor de la media y ambas se expresan en las mismas unidades. (SAE, 2016).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

S: Desviación estándar.

x_i : Numero de muestra.

\bar{x} : Media muestral.

n: Numero de muestras.

- Intervalos de confianza: Es un rango de dos valores dentro del cual puede estar determinada magnitud con cierta confianza en la probabilidad. Para muestras $n < 30$, se lo denomina como $100(1 - \alpha)\%$. Cuando el intervalo de confianza es más amplio se tendrá una mayor seguridad que contiene determinado parámetro. (Walpole et al., 2012).

$$IC = \bar{x} \pm \frac{t_{(n-1; \frac{\alpha}{2})} * S}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$t_{(n-1; \frac{\alpha}{2})}$: Puntos porcentuales en la distribución t Student que tiene grados de libertad $n - 1$ y área bajo la curva de $\frac{\alpha}{2}$.

Prueba F

La prueba F es un método de comprobación de similitud entre varianzas de dos muestras aleatorias simples. Donde los tamaños de las muestras m y n pueden ser diferentes de varianzas son S_1^2 y S_2^2 . Este método también plantea parámetros que pueden ser evaluados denominados hipótesis nula (Navidi, W. 2006). Se tiene que:

$$S_1^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Ec. 3}$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Ec. 4}$$

La hipótesis nula donde las varianzas no tienen diferencias significativas entre si es:

$$H_o: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1$$

Los valores estadísticos de la tabla de puntos porcentuales de distribución F se representa como el cociente de las dos varianzas muestrales, la cual depende de dos grados de libertad, uno para el numerador y otro para el denominador (Navidi, W. 2006):

$$F = \frac{S_2^2}{S_1^2} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

F : Puntos porcentuales de la distribución F.

Se acepta la hipótesis H_0 cuando se comparan los valores tabulados de los puntos porcentuales de la prueba F, F_{Tab} , con el valor F obtenido (SAE, 2016).

1.4 FISURACIÓN

Cuando un elemento de hormigón armado se flexiona los esfuerzos de tracción son recogidos por el acero y el hormigón no contribuye. Si se compara, la deformación del hormigón debida a la tensión de fisuración es cercana a 0.1/1000. Mientras que el acero comienza a plastificarse a una deformación alrededor de 2/1000. Es por esta característica que el hormigón se fisura. Debido al mecanismo de disipación de energía, una estructura de hormigón debe tener fisuras en al menos las proximidades de las secciones críticas, para cargas de servicio (Unidad Docente de Hormigón Estructural 2009).

1.4.1 Causas de la Fisuración en Elemento de Hormigón

Existen varios factores por los cuales se puede generar fisuras en el hormigón, pero las reconocidas son:

- Aplicación de cargas exteriores
- Deficiencia en armadura
- Variación de la temperatura ambiental
- Contracción plástica del hormigón
- Fisuración por corrosión de la armadura

1.4.2 Aplicación de cargas exteriores

Elementos sometidos a flexión

Es fundamental tratar sobre la resistencia a la tensión del hormigón sometido a flexión. El módulo de ruptura ha sido ampliamente usado para abordar este tema. Este módulo se lo obtiene usualmente a la aplicar dos cargas a los tercios de la luz de la viga. (McCormarc et al., 2017). El módulo de ruptura se encuentra definido de la siguiente manera (ACI 318, 2019):

$$f_r = 2\lambda\sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

f_r : Módulo de ruptura.

λ : Factor de modificación.

f'_c : Resistencia a la compresión.

Las grietas en el concreto comienzan a desarrollarse después de que se ha excedido el módulo de ruptura. Esto se debe a que los esfuerzos de tensión en la parte inferior de la viga son iguales al módulo de ruptura. Esta etapa se la conoce como momento de agrietamiento, M_{cr} . Además, las grietas se ubican en aquellos puntos donde el momento real es mayor al M_{cr} . Al continuar aumentando la carga, dichas grietas tienden a expandirse hacia el eje neutro (McCormarc et al., 2017).

Si se analiza los esfuerzos en la sección de concreto simple, el sistema se encuentra en equilibrio **Figura 2 b**. El eje neutro se halla en la mitad de la altura de la sección y el diagrama de esfuerzos trabajara en el rango elástico lineal. Cuando se alcanza la resistencia a tracción del hormigón en la fibra inferior, este ya no puede transmitir esfuerzos **Figura 2 c**, por lo que no podrá equilibrar los esfuerzos internos. Por tanto, el elemento se vuelve inestable. (Báez et al., 2015)

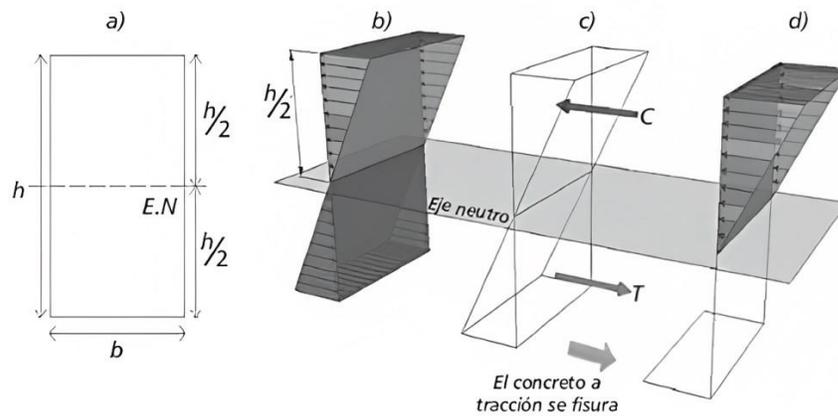


Figura 2. Esfuerzos en la sección transversal de elemento sometido a flexión.

Fuente: (Báez et al., 2015).

1.4.3 Fisuración por contracción plástica

Este fenómeno se produce cuando existe una pérdida de humedad muy rápida. Esta al ser combinada con la temperatura ambiental, la humedad relativa y la velocidad del viento en la superficie, provocan la aparición de grietas. De modo que si la humedad superficial desaparece mucho más rápido de lo que el hormigón es capaz de expulsar agua este se contraerá. (Maurello et al., 2020)

Debido a esta interacción entre pérdida de agua y el hormigón recién colocado, se produce un proceso de endurecimiento. Lo que desarrollará tensiones de tracción dando origen a fisuras de profundidad variable. Estas fisuras antes mencionadas dan lugar a patrones de distribución poligonales o bien paralelas entre sí. Las fisuras por retracción plástica comienzan con poca profundidad, pero pueden llegar a ser de una profundidad que abarque la totalidad del elemento. (Maldonado, 2017)

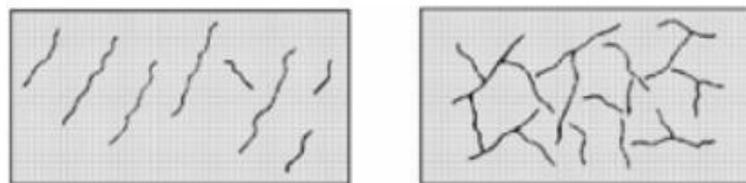


Figura 3. Patrones típicos de fisuras por contracción.

Fuente: (Polpaico, 2018).

1.4.4 Fisuración por corrosión de armadura

El hormigón al ser material permeable permite el paso de agua y otros agentes nocivos lo que deteriora el acero en su interior. (Bossio et al., 2016). Este proceso es conocido como corrosión generalizada, ocurre en toda la superficie y es la que mayor pérdida de volumen genera. (Salazar Jiménez, 2015). En un entorno húmedo con presencia de cloruros el hormigón armado se ve sumamente perjudicado. Según Bossio et al., (2016), el acero en este tipo de entorno comienza a verse afectado por esta reacción a los 120 días.

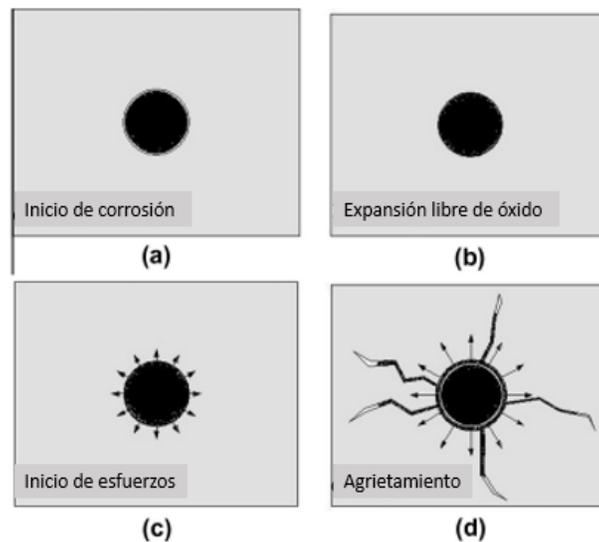


Figura 4. Proceso de corrosión de refuerzo.

Fuente: (Šavija et al., 2013).

1.4.5 Importancia del control de fisuras

Estética de la estructura, esto se debe a que los usuarios generalmente no esperan encontrarse con ningún tipo de abertura. Pero cuando esto ocurre, se puede tener un sentimiento de falta de confianza. Esto sucede especialmente cuando la retracción del hormigón no se controla de manera adecuada, se genera grietas que son poco agradables a la vista. Estas grietas son usualmente perjudiciales para losas, muros, etc. (Darwin et al., 2016).

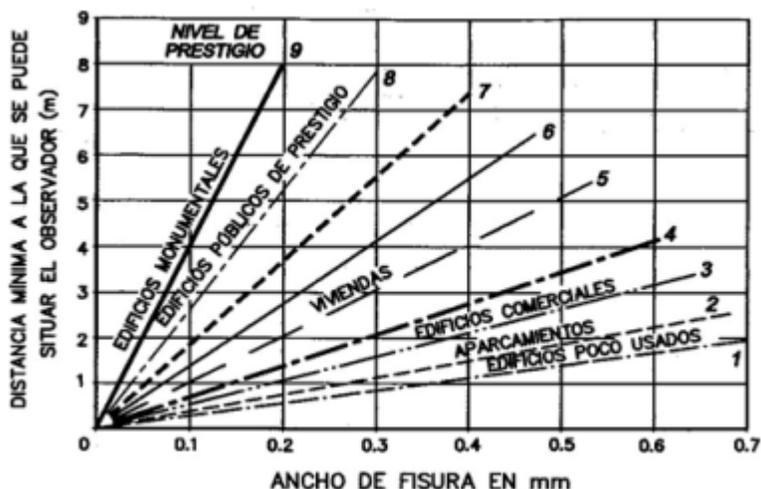


Figura 5. Anchos de fisura aceptables desde el punto de vista estético.

Fuente: (Unidad Docente de Hormigón Estructural 2009).

1.5 INTERACCIÓN DE FIBRAS CON EL HORMIGÓN

El concreto simple es un material compuesto, de naturaleza frágil y de muy baja capacidad de carga a flexión. La adición de un elemento con buenas características mecánicas pretende absorber parte de la tensión recibida de modo que la durabilidad se vea incrementada. Al existir varios tipos de fibras, la de mayor uso e investigación es la fibra de acero. (Subramani et al., 2020) Sin embargo, hay una gran cantidad de fibras vegetales que presentan grandes propiedades mecánicas. (Esguerra et al., 2020).

A medida que la proporción de fibra vegetal aumenta en la matriz de hormigón, también aumenta la resistencia a flexión y el comportamiento ante la fisuración. Por otro lado, a medida que se incrementa la cantidad de fibra vegetal la trabajabilidad se ve comprometida. La fibra al ser un elemento vegetal tiende a ser hidrofílica por lo que absorbe agua del medio que la rodea. (Bittner et al., 2022).

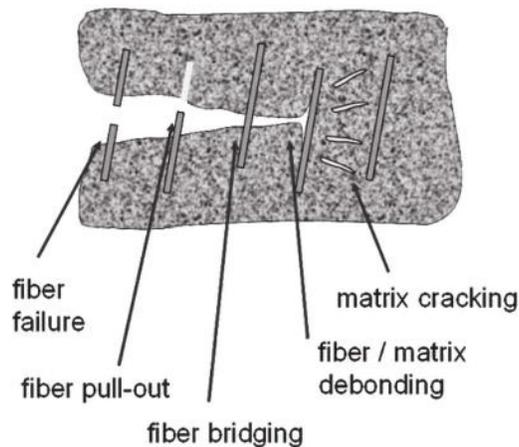


Figura 6. Comportamiento mecánico de fibras ante aplicación de cargas.

Fuente: (ACI 544-4R, 2018).

1.6 VARIACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE ARENA EN LA DOSIFICACIÓN

Existen dos parámetros importantes cuando hay grietas en un elemento de concreto, estos son: la proporción de arena y la proporción de grava. Cuando la relación de arena en la dosificación es pequeña, la cantidad de mortero de cemento no logra cubrir por completo toda la grava. Esto provoca mayor porosidad en la mezcla, lo cual conduce a mayor agrietamiento. Además, al tener menor cantidad de arena, la resistencia a la compresión disminuye. (Tang et al., 2016).

Cuando la relación de arena aumenta, las grietas tienden a disminuir, al mismo tiempo que la resistencia del concreto aumenta. Pero existe una proporción crítica de arena, que, al sobrepasarla, la superficie de grietas vuelve a aumentar. Después de sobrepasar la proporción crítica de arena la resistencia del concreto también se ve incrementada. (Tang et al., 2016). Al mismo tiempo, el área de grietas por área de superficie asciende.

Tabla 2. Variación de la cantidad de grietas por metro cuadrado al aumentar arena.

Numero de prueba	Arena ($\frac{kg}{m^3}$)	Area total promedio de fisruas por unidad de area (mm^2/m^2)
3001	773	201,6
3002	810	178,5
3003	840	282,2
3004	883	319,2

Fuente: (Tang et al., 2016).

2. METODOLOGÍA

2.1 MUESTREO DE MATERIALES

De acuerdo con las especificaciones del ASTM es necesario mezclar bien antes de extraer una muestra de acuerdo con el tamaño nominal máximo de tamiz. Siendo cantidad de la muestra de agregado fino y grueso la misma. Representada en la siguiente tabla:

Tabla 3. Masa requerida para ensayos de acuerdo con el tamaño del agregado grueso.

Tamaño nominal máximo, mm (in).	Tamaño de muestra de prueba, kg (lb)
9,5 (3/8)	1 (2)
12,5 (1/2)	2 (4)
19,0 (3/4)	5 (11)
25,0 (1)	10 (22)
37,5 (1½)	15 (33)
50 (2)	20 (44)

Fuente: ASTM C136, 2019.

Equipos

- Pala de mano con borde recto
- Bandeja
- Horno de calor seco

Procedimiento

- En 1 bandejas de 1x0,5 metros colocar 40kg de agregado grueso, distribuyendo el material por toda la superficie.
- Secar la bandeja durante un periodo de 24 horas a 110 °C. Posteriormente, retirar el material del horno y esperar durante otras 24 horas para que la muestra se estabilice a temperatura ambiente.
- Colocar la bandeja en una superficie dura y nivelada, de modo que no se pierda material. Con ayuda de la pala mezclar bien, volteando la muestra por completo 3 veces, con la última paleada realizar un montículo en el centro de la bandeja, realizar este proceso hasta que todo el material forme una sola pila cónica.
- Aplanar el cono y dividir la muestra en cuatro cuadrantes iguales.
- Separar 2 cuadrantes diagonales entre sí y los cuadrantes restantes mezclarlos. De acuerdo con el tamaño máximo nominal del agregado grueso, recoger 1 kg de muestra, de la mezcla resultante.
- Repetir el mismo procedimiento para el agregado fino.

2.2 GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO

Una vez finalizado el proceso de muestreo del material, donde se obtuvo 1kg de cada agregado, se realiza un análisis granulométrico a fin de garantizar parámetros necesarios a la hora de realizar la dosificación. Un parámetro importante para garantizar una adecuada trabajabilidad es el módulo de finura.

Equipos

- Tamizador manual desde 3/8 pulgadas. hasta N. ° 200.

Material

- 1 kg de arena.

Procedimiento

- Apilar los tamices de forma decreciente en tamaño desde arriba hacia abajo. Colocar el tamizador manual sobre una superficie sólida y nivelada.
- Colocar la muestra en la parte superior de los tamices. Comenzar a agitar con movimiento circulares y pequeños golpes del sobre la superficie. Continuar con este proceso durante 10 minutos aproximadamente.
- Una vez finalizado el proceso de tamizado, verificar que dentro de cada tamiz individual no más del 1% en masa de la muestra atravesase dicho tamiz durante un minuto de tamizado manual.
- Finalizado este proceso verificar que la cantidad retenida en masa de cada tamiz no sobrepase lo estipulado en la ASTM C136-19. Y calcular los porcentajes retenidos en cada tamiz.

2.2.1 Cálculo de módulo de finura

Se suma todos los porcentajes de material retenido en los siguientes tamices: 1½ pulg., 3/4 pulg., 3/8 pulg., N.º4, N.º8, N.º16, N.º30, N.º50, N.º100 y a esta suma dividirla para 100. De modo que se la puede expresar como:

$$M.F = \frac{\sum_{1\frac{1}{2}}^{N.º100} (N.º tamiz)}{100} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

M.F: Módulo de finura

$\sum_{1\frac{1}{2}}^{N.º100} (N.º tamiz)$: Sumatoria de masa retenida desde el tamiz 1½ pulg hasta el tamiz N.º100.

Densidad relativa y aparente

Siguiendo con los lineamientos descritos en la ASTM C 128 se describe le proceso:

- a) Dentro de un recipiente colocar 1Kg de agregado fino y sumergirlo por completo para garantizar la saturación en los poros de la muestra.
- b) Transcurrido 24 horas apartar el agregado del agua y secar la superficie de la masa.
- c) Colocar al agregado sobre una bandeja, que será secada en el horno a 110°C±5

2.3 CONTENIDO DE HUMEAD EN LA FIBRA

Equipos

- Horno de convección.
- Botella de pesaje.
- Balanza 1mg de sensibilidad.
- Regla.
- Guantes resistentes a altas temperaturas

Materiales

- 20 gramos de fibra de 2 cm de longitud.
- Guillotina de papel.

Procedimiento

- Extraer de manera aleatoria una muestra de abacá, de aproximadamente 30 gramos.
- Colocar las largas fibras sobre la superficie de corte de la guillotina y distribuidas. Con ayuda de una regla aplicar presión, medir los 2 centímetros y realizar el corte. Esto a fin de garantizar longitudes no tan dispersas de toda la muestra. Realizar los cortes necesarios hasta obtener 20 gramos de fibra de 2 centímetros.
- Posteriormente colocar la muestra en la botella de pesaje, cerrarla y con ayuda de una balanza de 1 mg sensibilidad registrar la masa. Esta será conocida como masa original.
- Configurar y precalentar el horno de convección hasta una temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, colocar la parrilla de división a 1/3 de la altura interior del horno.
- Abrir la botella de pesaje con la muestra y colocarla dentro del horno durante 24 horas. Transcurrido ese tiempo, con ayuda de guantes extraer la botella del horno, cerrarla nuevamente y pesar la muestra.
- Colocar la botella abierta nuevamente en el horno, durante 3 horas. Pasado este tiempo, si su masa no varía más del doble de la sensibilidad de la balanza, es decir 2 mg el ensayo es detenido y se registra esta última masa. Esta será conocida como masa seca al horno.

2.3.1 Cálculo de contenido de humedad de la fibra

$$H_F = \frac{m_o - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

H_F : Contenido de humedad de fibra de abacá. (%)

m_o : Masa original.

m_s : Masa secada al horno.

2.4 TRATAMIENTO CON HIDRÓXIDO DE SODIO

El tratamiento químico con hidróxido de sodio consiste en realizar una solución al 4% de concentración, obtenida mediante una relación en peso. El soluto empleado es de concentración pura del lote A0423820, mientras que el solvente utilizado fue agua destilada. Debido a la naturaleza corrosiva de este compuesto, se utilizó recipientes y herramientas de vidrio o cerámica. Dadas las condiciones previamente mencionadas, la relación empleada es la siguiente:

$$g \text{ de solución} * \frac{4 \text{ g de NaOH}}{100 \text{ g de solución}} \quad \text{Ec. 9}$$

Equipos

- Balanza con una precisión de 0,001 g.
- Vaso de precipitación de 500 ml.
- Agitador magnético.
- Hidróxido de sodio puro.
- Paleta de plástico.
- Horno de secado.

Materiales

- Fibra de abacá de 4 centímetros de longitud.
- Recipiente hermético de almacenamiento.
- Agua destilada.
- Guantes de nitrilo.

Procedimiento

Las muestras que fueron sometidas al tratamiento químico fueron divididas en tres grupos:

Grupo A: Fibras de 21 cm de longitud para ensayos físicos y mecánicos.

Grupo B: Fibra para ensayo de absorción.

Grupo C: Fibras de 4 cm de longitud para su adición en dosificación patrón.

- Una vez cortada la fibra para los grupos mencionados anteriormente, se debe pesar la muestra en su estado natural. Tomando en cuenta su almacenaje previo en un ambiente fresco y seco.
- En un vaso de precipitación pesar 500 g de agua destilada.
- Colocación de guantes de nitrilo para seguridad.
- Con precaución y con ayuda de la paleta de plástico pesar 20 g de hidróxido de sodio por cada 500 g de agua destilada, dado que se trata de una solución en peso.
- Colocar el vaso de precipitación con el agua destilada sobre el agitador magnético y configurarlo a 80 rpm.
- Colocar el hidróxido de sodio de forma gradual, para evitar formar acumulación del compuesto químico en los bordes del vaso. Agitar hasta observar que se ha disuelto por completo el compuesto (NaOH). Almacenar la solución formada en el recipiente hermético y sellarlo. Repetir el procedimiento hasta obtener 3 litros de solución.
- En otro recipiente hermético, colocar 330 gramos de fibra, posteriormente verter la solución formada hasta que la fibra se encuentre sumergida por completo. Sellar el recipiente y colocarlo en un lugar fresco y cubierto.
- Luego de 24 horas, con la ayuda de un cernidor de plástico extraer la fibra sumergida, colocarla en un recipiente y lavarla con agua de grifo. Con ayuda de tiras de pH verificar hasta obtener un valor neutro.
- Finalmente, extraer la fibra y distribuirla sobre una bandeja de acero inoxidable. Posteriormente colocar la bandeja con la muestra dentro de un horno de secado a 110 °C durante 24 horas. Transcurrido ese tiempo la muestra es retirada del horno para su uso.

2.5 ABSORCIÓN DE FIBRA TRATADA QUÍMICAMENTE

Par determinar la cantidad de agua que es capaz de absorber el abacá se utilizó únicamente el grupo B, a fin de no alterar el resto de los grupos de muestras. Se observó que posterior a este tratamiento la capacidad de absorción de la fibra se ve reducida. Lo que podría conllevar a una

errónea estimación de corrección de agua en la mezcla. Con este ensayo se busca realizar una corrección de humedad en la dosificación a fin de que la fibra no absorba el agua destinada en la reacción del cemento.

$$\%_{WA} = \frac{m_{af} - m_{ai}}{m_{ai}} * 100 \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$\%_{WA}$: Porcentaje de agua que absorbe el abacá.

m_{ai} : Masa inicial de fibra. (g)

m_{af} : Masa de fibra en estado SSS. (g)

Equipo

- Balanza 1 mg de sensibilidad.
- Bandeja de acero inoxidable.
- Coladero.

Materiales

- Fibra de abacá con tratamiento de hidróxido de sodio del grupo B.
- Toalla.

Procedimiento

- Con ayuda de la balanza de 1 mg de sensibilidad registrar la masa del recipiente. Colocar la fibra del grupo B sobre la bandeja y registrar la masa total de ambos.
- Anadir agua hasta que la fibra se encuentre completamente sumergida y colocar en un lugar seguro donde no exista riesgo de que ingrese algún otro tipo de material. Dejar reposar durante 24 horas.
- Posterior a este tiempo, drenar el agua con ayuda de un coladero y colocar la fibra sobre una toalla. Con los extremos de la misma, secar la superficie de la muestra de manera suave de modo que se encuentre en estado SSS.
- Vaciar la bandeja de agua y colocar la muestra dentro. Volver a pesar sobre la balanza de 1 mg de precisión y registrar el dato de masa.



Figura 7. Proceso de ensayo de absorción.

Fuente: Prado, A.

2.6 ENSAYO DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Descripción

Para determinar estas características, se utilizó una balanza de precisión de 0,1 mg. Se escogió especímenes aleatorios con buen espesor y de tonalidad clara, todos con una longitud de 21 centímetros pertenecientes al grupo A. Dentro de este grupo se subdividió en dos grupos, el grupo A.1 y el grupo A.2, siendo con tratamiento y sin tratamiento químico respectivamente. Todas las muestras fueron pesadas individualmente. El subgrupo A.1, 33 fibras sin ningún tipo de tratamiento. Mientras subgrupo A.2 también 33 fibras, pero con tratamiento químico de hidróxido de sodio.

Para la obtención de la resistencia, elongación de rotura y tenacidad se siguió la norma estándar ASTM D 2256 a una velocidad de prueba de 8 mm/min. Esta consiste en colocar los dos extremos de una muestra entre mordazas, para evitar que la fibra libre se deslice. Posteriormente se aplicará fuerza de tensión a la velocidad previamente mencionada. La máquina registra el incremento de magnitud hasta llegar a la fuerza de rotura del elemento ensayado.

- Grupo A** {
- Subgrupo A.1 (Sin tratamiento químico)
 - Subgrupo A.2 (Con tratamiento químico)

Terminología

- Densidad lineal: masa expresada por unidad de longitud, para este caso la unidad que se implemento es el (tex) que se define como la masa en gramos por cada metro de fibra. (ASTM D4848, 2018).
- Tenacidad: Capacidad que tiene un determinado material para absorber energía antes de romperse. La unidad empleada es el (cN/tex) esta representa centiNewton aplicados cada tex. (ASTM D4848, 2018).



Figura 8. Almacenamiento y etiquetado de muestras.

- **Fuente:** Prado, A.

Equipo

- Balanza de precisión 0,1 mg encapsulada: Con la finalidad de evitar que el viento cause alteraciones en la obtención de la masa de cada fibra.



Figura 9. Balanza encapsulada.

- **Fuente:** Prado, A.

- Máquina de prueba a tensión.

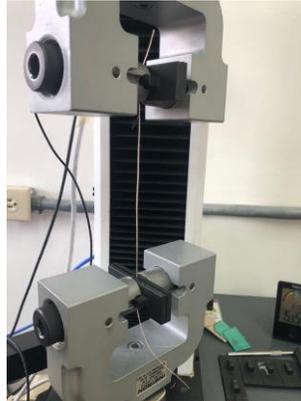


Figura 10. Equipo de ensayo a tensión electrónico.

Fuente: Laboratorio textil EPN.

Procedimiento del ensayo según ASTM D 2256

- Se pre-acondiciona las muestras a ensayarse de modo que se logre un equilibrio de humedad aproximado con el de la atmosfera. El lugar de ensayo debe mantener una temperatura no superior a los 50 °C. Se considera un pre-acondicionamiento efectivo cuando el pesaje sucesivo de dos muestras no varía en más de 0,1% del peso de la fibra, en un intervalo de tiempo máximo de 15 minutos.
- Se ubicó un extremo de la fibra en una de las mordazas, procurando realizar cualquier tipo de giro o estiramiento de la misma. Colocar el extremo faltante en la otra abrazadera realizando una tensión previa de $0,5 \pm 0,1$ cN/tex, esto permite eliminar algún tipo de holgura.
- Iniciar la prueba controlada a una velocidad de aplicación de fuerza de 8 mm/min. Al mismo tiempo se registra el alargamiento de la fibra con tres cifras significativas.

Adicionalmente si se produce deslizamiento de la fibra entre las mordazas o esta llega a romperse dentro de los 3 mm próximos a cada abrazadera y el resultado del ensayo cae por debajo del 20% del promedio de la fuerza de rotura del conjunto, la muestra debe ser rechazada. (ASTM D2256, 2021).

2.6.1 Obtención de tenacidad de rotura

Una vez finalizado el ensayo individual de las 62 muestras se calculó la tenacidad de rotura mediante la siguiente expresión:

$$B = \frac{F}{T} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

B: Tenacidad de rotura (cN/tex).

F: Fuerza de rotura (cN).

T: Densidad lineal (tex).

2.6.2 Alargamiento

Para realizar el cálculo de elongación de las muestras se empleó la siguiente expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{E * R * 100}{C * L} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

ε_p : % de alargamiento.

E: Distancia tomada desde el punto cero en la gráfica fuerza-elongación hasta el punto correspondiente de la fuerza de pre-tensión de la fibra. (mm).

R: Velocidad de prueba (mm/min).

C: Velocidad del grafico de registro (mm/min).

L: Longitud nominal de la muestra (mm).

SUBIR EL NUMERO DE MUESTRAS QUE ESTAN EN LOS RESULTADOS.

2.7 DOSIFICACIÓN

Para obtener la dosificación inicial se calculó el volumen total a emplearse. Considerando que se realizó 6 ensayos para cilindros, 6 para vigas, 6 para placas todas ellas con una adición de fibra al 0.5% y adicionalmente 3 probetas de hormigón simple de cada elemento descrito para

su respectiva comparación. Es necesario acotar que el tamaño máximo recomendado para un elemento de hormigón dependerá de 1/5 de su menor dimensión de la sección o la tercera parte de la profundidad de la losa. (Darwin et al., 2016).

Tabla 4. Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción.

Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción		
Tipo de construcción	Asentamiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	7,5	2,5
Zapatas y muros de sub-estructura sencillos	7,5	2,5
Vigas y muros reforzados	10	2,5
Columnas para edificios	10	2,5
Pavimentos y losas	7,5	2,5
Concreto masivo	7,5	2,5

Fuente: (Luna, 2014)

2.7.1 Agua teórica necesaria

Este parámetro resulta muy relevante ya que la trabajabilidad y la resistencia dependen en gran medida de la cantidad de agua que sea agregada por metro cubico de hormigón.

Tabla 5. Cantidad de agua en lt/m³ en función del tamaño máximo del agregado grueso, para diferentes asentamientos.

Asentamiento cm	Tamaño máximo del agregado grueso cm, (pulg)						
	0,95 (3/8)	1,27 (1/2)	1,9 (3/4)	2,54 (1)	3,81 (1 1/2)	5,08 (2)	7,62 (3)
Hormigón sin inclusión de aire							
2,5 a 5,1	208	198	183	178	163	153	144
7,6 a 10,2	228	218	203	193	178	168	158
15,2 a 17,8	243	228	213	203	188	178	168
% de aire contenido	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3
Hormigón con inclusión de aire							
2,5 a 5,1	183	178	163	153	144	134	124
7,6 a 10,2	203	193	178	168	158	149	139
15,2 a 17,8	213	203	188	178	168	158	149
% de aire contenido	8	7	6	5	4,5	4	3,5

Fuente: (Luna, 2014)

2.7.2 Volumen agregado grueso

Tabla 6. Volumen aparente de agregado grueso (m^3).

Tamaño máximo nominal del agregado grueso		Volumen en m^3 de agregado grueso seco y compactado, por m^3 de hormigón							
		Módulo de finura del agregado fino							
cm	pulg	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
1,00	3/8	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,4
1,25	1/2	0,56	0,55	0,54	0,53	0,53	0,52	0,5	0,49
1,90	3/4	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,6	0,59
2,54	1	0,71	0,7	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64
3,81	1 1/2	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,7
5,08	2	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73
7,62	3	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,8	0,79	0,78

Fuente: (Luna, 2014)

2.7.3 Relación agua cemento

En esta relación, mientras el valor se siga acercando más a la unidad el hormigón tiene a ser de menor resistencia.

Tabla 7. Relación agua-cemento (a/c) recomendada

Relación agua-cemento (litros/kg de cemento)	Litros de agua por cada saco de 50 kg de cemento	Resistencia probable a la compresión a los 28 días (kgf/cm^2)	
		Hormigón sin inclusión de aire	Hormigón con inclusión de aire
0,353	17,5	425	325
0,445	22,5	350	280
0,53	26,5	280	210
0,623	31	210	280
0,705	35,5	180	140
0,8	40	140	110

Fuente: (Luna, 2014)

Una vez obtenido los parámetros anteriores es posible obtener el factor de cemento que relaciona el volumen de agua con la relación agua cemento.

$$\text{Factor de cemento} = \frac{c}{r} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

c: cantidad de agua por metro cubico.

r: relación agua cemento (a/c).

Adicionalmente, junto con el factor de cemento y la densidad de este es posible determinar el volumen requerido en la dosificación a elaborar.

$$Vol_{\text{cemento}} = \frac{\text{Factor de cemento}}{\text{densidad del cemento}} \quad \text{Ec. 14}$$

Para finalmente mediante diferencia de volumen obtener la cantidad necesaria de arena en la mezcla.

$$Vol_{\text{arena}} = Vol_{\text{total}} - Vol_{A.Gruoso} - Vol_{\text{agua}} - Vol_{\text{cemento}} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde

Vol_{total} : Volumen total de probetas o elementos.

Vol_{arena} : Volumen de arena por metro cubico de hormigón.

$Vol_{A.Gruoso}$: Volumen agregado grueso por metro cúbico

Vol_{agua} : Volumen de agua por metro cúbico

Vol_{cemento} : volumen de cemento por metro cubico de hormigón.

2.7.4 Corrección de humedad

Cada agregado tendrá una capacidad determinada de absorción de humedad, lo cual podría interferir en la relación agua cemento empleada. Es por esto que se requiere realizar una corrección para garantizar que los agregados lleguen a una condición S.S.S de modo que no altere la dosificación. (Luna, 2014). Cabe recalcar que también los agregados pueden llegar a absorber humedad del ambiente en el que se encuentran y al añadir más agua provocará una mezcla muy suelta.

2.7.5 Proporción de arena en mezcla

Con la finalidad de evidenciar agrietamiento en la superficie de las losetas de hormigón simple se realizaron modificaciones entre dosificaciones. Tang et al., (2016) afirma que al aumentar arena posterior a una cantidad crítica aumenta las grietas y al mismo tiempo, la resistencia. A fin de evitar una reducción significativa en la resistencia del hormigón se decidió aumentar un 10% de la cantidad de arena inicial en la dosificación final utilizada.

2.8 ELABORACIÓN DE HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FIBRA

2.8.1 Probetas

Para obtener los resultados presentes en el documento, se realizaron las pruebas pertinentes de los elementos, los cuales se dividen de la siguiente forma:

Grupo E: Hormigón simple

- Subgrupo E.10: 3 vigas de 0,1x0,1x0,4 (m).
- Subgrupo E.20: 3 cilindros de 0,1x0,2 (m).
- Subgrupo E.30: 3 losetas (palcas) de 0,025x0,4x0,75 (m).

Grupo P: Hormigón con fibra tratada químicamente al 0,5% del peso del agregado grueso.

- Subgrupo P100: 6 vigas de 0,1x0,1x0,4 (m).
- Subgrupo P200: 6 cilindros de 0,1x0,2 (m).
- Subgrupo P300: 6 losetas (placas) de 0,025x0,4x0,75 (m).

2.8.2 Cantidad y longitud de fibra

La cantidad de fibra tratada con hidróxido de sodio se la obtiene en función del porcentaje del agregado grueso de la dosificación final. Por tanto, se realiza la elaboración de elementos de hormigón considerando un porcentaje de 0.5% con respecto al peso del agregado grueso. La ecuación 18. permite determinar la cantidad en masa a emplearse:

$$m_{fi} = M_{TG} \times \%_{fibra}$$

Ec. 16

Donde:

- m_{fi} : Mas de fibra (Kg)
- M_{TG} : Masa total de agregado grueso (Kg)
- $\%_{fibra}$: % de fibra del proyecto.

El ACI 544-4R (2018) establece el rango de longitudes de fibra de acero entre 3 a 65 mm. Tomando como referencia estos valores establecidos, se utilizó una longitud estándar de 40 mm±5. Esta medida de fibra permite garantizar que sean lo suficientemente pequeñas para lograr distribuirse en todo el volumen que conforman los elementos, haciendo uso de métodos de mezcla comunes.

2.8.3 Losetas con fibra tratada

Para la adición de fibra en los elementos de hormigón se pueden manejar dos criterios, entre ellos se encuentran; con respecto al volumen total de hormigón o con respecto al peso agregado grueso. Según la norma ACI 544-4R-18 las cantidades de fibra de acero respecto al metro cubico de hormigón se encuentran entre 5 y 7 kg/m³ esto representa un 0.2% con relación a su volumen. Este porcentaje bajo se debe a la compleja trabajabilidad que representa las fibras de acero. Por lo que si se considera que la fibra natural es un material maleable la trabajabilidad no se vería excesivamente comprometida.

Equipo

- Máquina de control de temperatura y viento.
- Anemómetro digital.
- Balanza 0.1g
- Balanza de precisión 0.001 g
- Termómetro bimetálico
- Bandeja para mezclas.
- Barra de acero inoxidable.
- Llana metálica.
- Máquina de secado rápido.

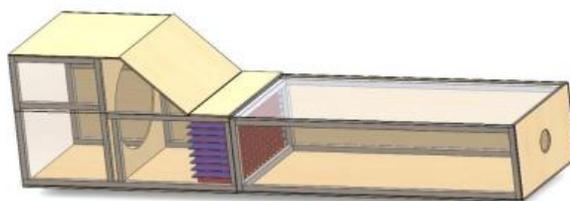


Figura 11. Máquina de secado con control de viento.

Fuente: (Amaguaña et al., 2023).

Materiales

- Agua
- Cemento
- Agregado fino
- Agregado grueso 3/8"
- Fibra de abacá tratada químicamente.
- Pala de mano.
- Recipientes para pesar.
- Encofrado de madera tratada 0,75x0,40x0,025 m.

Procedimiento

- Con la dosificación patrón previamente obtenida calcular las cantidades requeridas para el volumen que soporta el encofrado consideran un nivel de pérdida del 6%.
- Para agregar la fibra calcular el 0,5% de la masa de agregado grueso, esta masa de fibra obtenida será la masa que se retirará de la masa de agregado grueso inicial.
- Pesar en la báscula con precisión de 0.1g los agregados secos, cemento y agua.
- Colocar la fibra previamente tratada y secada en un recipiente ligero. Con ayuda de la balanza de precisión 0.001g pesar la cantidad requerida de fibra de abacá al 0.5% de la cantidad de agregado grueso obtenida en el paso anterior.
- En una bandeja amplia colocar el agregado fino pesado junto con el cemento y mezclar aproximadamente 5 minutos hasta notar la correcta integración de ambos materiales.

- Deshebrar la fibra, para evitar que se forme agrupaciones y complique el proceso de mezclado de los elementos que conforman el hormigón. Dispersarla sobre toda la superficie de la bandeja que contiene arena con cemento y mezclar todo.
- Formar un montículo, seguido de un hueco en el centro y colocar la grava alrededor de la parte externa de su base.
- Colocar el agua en el centro del hoyo y mezclar por completo para obtener una correcta integración de los elementos secos con el agua, reduciendo las grandes masas de hormigón que se forman al iniciar este proceso, con ayuda de la pala de mano.
- Vaciar parte de la mezcla en los extremos del encofrado, con ayuda de la pala mover la mezcla para llegar a todas las esquinas. Colocar el resto de material de modo que quede distribuido por toda la superficie. **Figura 12.**
- Con ayuda de una barra de acero inoxidable retirar los excesos de la superficie. Posteriormente con ayuda de un mazo de goma, golpear 15 veces todo el perímetro del encofrado para reducir la cantidad de aire atrapado.
- De manera cuidadosa con la llana metálica darle un mejor acabado superficial a la masa de hormigón.
- Colocar la placa de encofrado dentro de la máquina de control de temperatura y viento. Seguido de colocar un termómetro bimetálico en el borde del encofrado.
- Encender la fuente de calor, esperar 4 minutos hasta observar que la temperatura interna se haya estabilizado, para este caso 58 °C.
- Registrar proceso con captura de fotos, colocando la cámara a una distancia de 0,6 metros ($\pm 0,01 m$) desde la superficie de hormigón, en intervalos de 30 minutos, durante 6 horas. Registrar datos de temperatura y de velocidad de viento en los mismos intervalos de tiempo.
- Para la obtención de la longitud de las grietas en la superficie de las placas sin fibra, es decir, de hormigón simple, se utilizó una regla como referencia gráfica. A fin de poder escalar las imágenes tomadas en AutoCAD y tener resultado más precisos en este apartado.

El procedimiento descrito es el mismo para la obtención de las losetas con hormigón simple, la única variable es que no se debe adicionarla fibra de abacá tratada químicamente con hidróxido de sodio.



Figura 12. Mezcla de arena, cemento y fibra.

Fuente: Prado, A.

2.8.4 Vigas y cilindros con fibras de abacá

La descripción del desarrollo de vigas y cilindros es similar al presentado en el numeral anterior, la única variación presente es la siguiente:

Equipo

- Encofrado prismático rectangular de 3 divisiones. 0,1x0,1x0,4 (m).
- Encofrado cilíndrico de 0,1x0,2 (m).
- Barra de acero inoxidable.
- Maso de goma.

Procedimiento

- Para agregar la fibra de abacá el procedimiento es el mismo que en la loseta; calcular el 0,5% de la masa de agregado grueso, esta masa de fibra obtenida será la masa que se retirará de la masa de agregado grueso inicial.

- Posterior a la mezcla de todos los agregados para formar hormigón junto con la fibra. Vaciar sobre el encofrado La primera capa de hormigón con fibra hasta una altura similar o superior a $\frac{1}{2}$ de la altura de la viga. Con ayuda de la barra colocarla de manera vertical y realizar 25 varilladas por toda la superficie del hormigón fresco, sin llegar a tocar el encofrado.
- Con ayuda del maso de goma realizar 15 golpes por todo el perímetro del encofrado, para eliminar cápsulas excesivas de aire.
- Vaciar la segunda capa de hormigón con fibra dentro del encofrado y repetir las 25 varilladas sobre toda la superficie de hormigón fresco. Realizar 15 golpes con el maso de goma por todo el perímetro del encofrado.
- Retirar excesos de la superficie y con ayuda de la llana darle mejor textura, hasta obtener una superficie lo más lisa posible.
- Colocar las probetas en un lugar alejado de la luz del sol. Dejar transcurrir 24 horas para su desencofrado, posteriormente extraer las probetas y sumergirlas dentro de agua para mantener un correcto proceso de curado.
- Las probetas se mantendrán en agua hasta el día de sus ensayos a flexión.

Se utilizó un procedimiento similar en la elaboración de vigas y cilindros de hormigón simple la única variable omitida fue la adición de fibra de abacá tratada químicamente.

2.8.5 Ensayos de compresión

Para este ensayo se utilizaron las probetas del grupo P200 y E.2. Las primeras fueron testeadas a la edad de 7, 14 y 28 días, mientras que el grupo E.2 a la edad de 7 y 28 días. El tratamiento inicial previo a los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas consiste en extraerlas del agua y secarlas con una toalla. De acuerdo con lo especificado en la ASTM C39, (2021), se realiza las mediciones de 2 diámetros, perpendiculares al eje longitudinal del cilindro, 3 alturas, luego, registrar la masa.

Si existen imperfecciones en la superficie de la probeta esta deberá ser pulida para evitar errores en el ensayo. Además, si la resistencia registrada es menor a la esperada existen los siguientes parámetros de validación para su rechazo.

- Presencia de grandes cavidades de aire.
- Evidencia de segregación.
- Cuando la fractura atraviesa el agregado grueso.

Dentro de la ASTM C39, (2021) existen 6 tipos de falla registrados, de acuerdo con la figura 13. Cuando el tipo de fractura no sigue un patrón similar al de estos tipos de falla, se debe realizar un dibujo y descripción.

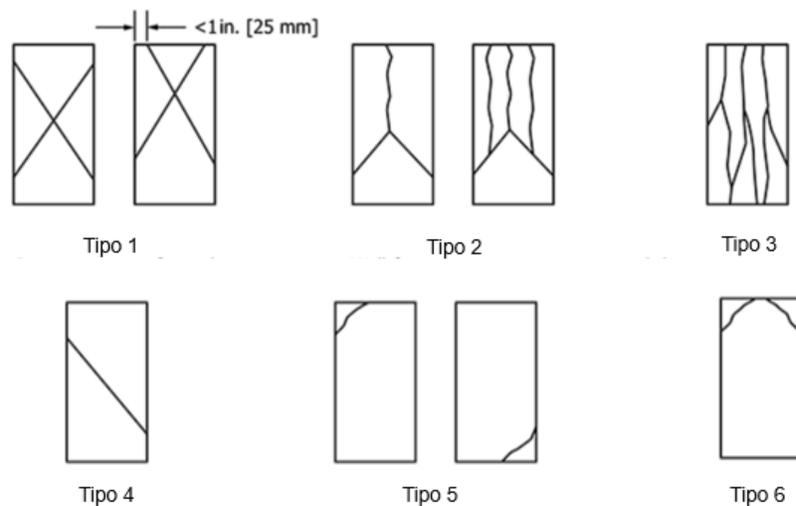


Figura 13. Tipos de fracturas en cilindros a compresión.

Fuente: (ASTM C39, 2021).

Donde:

- **Tipo 1:** Conos razonablemente bien formados en ambos extremos, con una distancia menor a 25 (mm).
- **Tipo 2:** Cono bien formado en un extremo, fisuras verticales que cruzan la cabecera, Cono no bien definido en el otro extremo.
- **Tipo 3:** Grietas verticales a través de ambos extremos, sin conos.
- **Tipo 4:** Fractura diagonal si fisuras en los extremos, para distinguir del tipo 1 golpear con un martillo.
- **Tipo 5:** Fracturas laterales en la parte superior o inferior, ocurre comúnmente con tapas no adheridas.

- **Tipo 6:** Similar al tipo 5 pero con un extremo del cilindro en forma de punta.

2.8.6 Ensayo a flexión

Para determinar la fuerza máxima que soporta uno de estos elementos sometidos a flexión, se utilizó las vigas del grupo E.10 y P100. Los ensayos para el primero fueron efectuados a los 7, 14 y 28 días. Mientras que para el segundo grupo a los 7 y 28 días de edad. Una vez retirada la probeta del agua es necesario secarla con una toalla. Realizar 3 mediciones aleatorias de base y altura en todo el eje longitudinal. Desde los extremos del elemento tomar 2,5 cm y marcarlo para obtener los puntos donde se colocarán los apoyos móviles. Desde dichos puntos, se obtiene la luz libre, la cuál será dividida para 3 de modo que se obtengan los puntos de aplicación de las cargas.

Equipo

- Máquina de ensayo de cargas.
- Rodelas o apoyos móviles
- Rodelas de aplicación de carga
- Deformímetro análogo

Procedimiento

- Con las longitudes previamente definidas colocar la viga sobre los puntos de apoyo de los extremos. Situar los rodillos de aplicación de carga en la cara paralela a los puntos de apoyo.
- Colocar el deformímetro análogo bajo la cara a tracción de la probeta y calibrarla hasta que la aguja se sitúe en la marca cero.
- Comenzar la prueba a una velocidad de aplicación de carga de 0,005 MPa/s y registrar los datos de carga cada 0.5 kN.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Dosificación

Tabla 8. Dosificación inicial con corrección por humedad.

Dosificación inicial		
Peso en kg por m ³ de hormigón		Relación
Agua	256,76	0,47
Cemento	548,78	1,00
Grava	641,7	1,17
Arena	808,45	1,47

Elaborado por: Prado, A.

La dosificación de la **tabla 8** fue planteada para llegar a una resistencia a la compresión de aproximadamente $260 \frac{kgf}{cm^2}$. Sin embargo, se obtuvo un $f'c$ de $240 \frac{kgf}{cm^2}$ a los 7 días, con lo cual se puede dar una idea de que se trataba de hormigón de una resistencia muy elevada. Este tipo de resistencias son para casos muy específicos en obra. Lo cual limita el tipo de uso de este estudio para elementos muy específicos.

Por tanto, se optó por obtener rango de mayor uso en construcciones, es decir, un hormigón de $f'c$ de $210 \frac{kgf}{cm^2}$ a los 28 días. Con lo cual los valores de la dosificación inicial fueron modificados de acuerdo con la **tabla 7**. Donde, a mayor cantidad de agua, tiende a disminuir la resistencia a la compresión.

Tabla 9. Dosificación 2 con corrección por humedad.

Dosificación 2		
Peso en kg por m ³ de hormigón		Relación
Agua	312,8	0,57
Cemento	548,78	1,00
Grava	641,7	1,17
Arena	808,45	1,47

Elaborado por: Prado, A.

Con esta dosificación se logró reducir la resistencia del hormigón simple y mediante ensayos a compresión se obtuvo un hormigón cercano a $f'c$ de 260 kgf/cm². Pese al aumento de la cantidad de agua en la mezcla, no se observó grietas en la superficie de las placas desarrolladas. Es por ello que esta dosificación tuvo que ser modificada nuevamente.

Tabla 10. Dosificación 3 relación patrón final utilizada en el desarrollo del proyecto, con corrección por humedad.

Dosificación 3		
Peso en kg por m ³ de hormigón		Relación
Agua	301,83	0,55
Cemento	548,78	1,00
Grava	641,7	1,17
Arena	889,29	1,62

Elaborado por: Prado, A.

La **tabla 10** presenta la relación final utilizada para la elaboración de cilindros de hormigón, vigas y losetas. Las losetas ensayadas presentaron una cantidad de grietas significativas en su superficie que son visibles a simple vista. Sin embargo, debido a la variación en la cantidad de arena presente en la **tabla 11**, la resistencia del hormigón incrementó. Lo que en los primeros ensayos a compresión a los 7 días presentó una resistencia mayor al 60% de 240 $\frac{kgf}{cm^2}$.

Tabla 11. Porcentaje de aumento de materiales respecto a la dosificación inicial.

Elemento	Dosificación 2 %	Dosificación 3 %
Agua	21,83	17,55
Cemento	0,00	0,00
Grava	0,00	0,00
Arena	0,00	10,00

Elaborado por: Prado, A.

3.1.2 Número de probetas

Se tomó como punto de partida los datos obtenidos de los ensayos a compresión de 6 muestras de hormigón con fibra a diferentes edades, tres de ellas a 7 y tres a los 28 días. Para construir

los intervalos de confianza se utilizó como variable X como la resistencia a compresión a los 7 días de edad, mientras que la variable Y como la resistencia a la compresión, pero a los 28 días de edad. De este modo se puede obtener el intervalo de confianza para ambas variables, se tomará un nivel de confianza del 95%, por tanto:

Tabla 12. Media y varianza para diferentes edades.

Edad	f'c (Kgf/cm ²)	(X _i - \bar{X}) ²	Edad	f'c (Kgf/cm ²)	(y _i - \bar{y}) ²
7	167,10	15,66	28	262,77	100,47
	184,14	171,17		290,01	296,41
	161,93	83,30		265,60	51,74
	\bar{x}	S ₁		\bar{y}	S ₂
	171,06	11,62		272,79	14,98

Elaborado por: Prado, A.

$$142,18 < IC_{7días} < 199,93$$

$$235,59 < IC_{28días} < 310,00$$

La hipótesis nula a ser probada es $H_0: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1$, por tanto:

$$F = \frac{224,31}{135,06} = 1,66$$

Si se compara este valor de F obtenido en la prueba con los valores porcentuales de la distribución F se evidencia que es mucho menor; F_{Tab} para dos grados de libertad de ambas variables X y Y es de $F_{Tab} = 19$. Por tanto, se acepta la hipótesis H_0 y se obtiene que con 6 muestras no representan diferencias significativas entre sí.

3.1.3 Propiedades mecánicas y físicas de la fibra de abacá

Las muestras analizadas en el laboratorio del centro textil del departamento de química, 33 son de fibras sin tratamiento (FST) y otras 33 de fibras con tratamiento químico (FCT). La longitud de cada elemento es de 21 centímetros. Se evidencia que existen una pérdida de capacidad a tracción de la FCT, sin embargo, de acuerdo con la teoría analizada, el tratamiento químico es un método que asegura la adherencia de la fibra a la matriz de hormigón, eliminando la capa exterior de cera.

Tabla 13. Propiedades mecánicas de la fibra de abacá.

		Masa [g]	Fuerza de rotura [N]	Elongación [%]	Densidad lineal [tex]	Tenacidad [cN/tex]
Fibra sin tratamiento	Promedio	0,0189	46,08	3,12	86,24	53,57
	Desviación estándar	0,0048	17,22	0,65	25,75	12,42
Fibra con tratamiento	Promedio	0,0141	26,25	2,28	68,03	40,99
	Desviación estándar	0,0044	9,99	0,55	20,91	11,71

Elaborado por: Prado, A.

Contenido de humedad

Al ser un producto vegetal sin apenas tratamiento previo a sus extracción y almacenamiento. La fibra de abacá contiene una cantidad relativamente baja de agua en su estado natural. Los resultados muestran que contiene el 12,9 % de humedad con una desviación de $\pm 0,9$ %.

Absorción

Debido a que se realizó los ensayo en hormigon exclusivamente con fibra sometida a tratamiento químico de hidróxido de sodio Na(OH) al 4% de concentración en masa. Se obtuvo la cantidad de absorción de agua en la fibra.

$$\%_{WA} = \frac{m_{af} - m_{ai}}{m_{ai}} * 100$$
$$\%_{WA} = \frac{309,585 - 100,018}{100,018} * 100$$
$$\%_{WA} = 209,567$$

3.1.4 Propiedades a compresión del hormigón

Compresión de hormigón simple (HS)

Con la dosificación 3 se obtuvieron mejoras a compresión respecto a la dosificación 2, al mismo tiempo que se logró visualizar presencia de grietas en las losetas de hormigón simple. Debido a esto, las probetas analizadas presentan resistencias a la compresión de valores medios, logrando

soportar una carga máxima de 248,1 kN que representa una resistencia a la compresión $f'c=310 \frac{kgf}{cm^2}$ a la edad de 28 días.

Tabla 14. Datos obtenidos del ensayo a compresión de hormigón sin fibra HS.

Descripción	Fábrica	Rotura	D1	D2	H1	H2	H3	Masa	Carga	Tipo de Falla
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	[kN]	
E.21	2023/06/28	2023/07/25	101,09	102,4	200,9	201,88	201	3682	151,35	2
E.22	2023/06/28	2023/07/25	102,4	102,25	198,95	200,15	198,4	3658	216,7	2
E.23	2023/06/28	2023/07/25	101,45	102,12	199,54	199,62	200,56	3677	248,1	2

Elaborado por: Prado, A.

Tabla 15. Resistencia a la compresión $f'c$ del HS.

Edad días	D (mm)	Área (cm ²)	Resistencia a la compresión (kgf/cm ²)
7	101,75	81,30	189,76
14	102,33	82,23	268,62
28	101,79	81,37	310,81

Elaborado por: Prado, A.

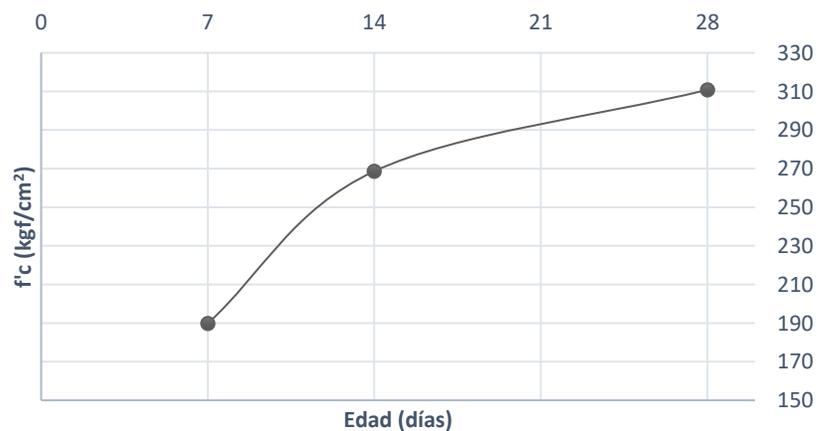


Figura 14. Resistencia a la compresión hormigón sin fibra HS.

Elaborado por: Prado, A.

Compresión de hormigón con fibra (HCF)

Al agregar fibra de abacá como componente de la dosificación. La resistencia a la compresión se ve reducida tanto a la edad de 7 días como a los 28. **La figura 15** muestra la reacción entre las probetas de hormigón simple y las que se agregó fibra. La desviación estándar de las muestras analizadas a los 28 días es baja, por tanto, los valores individuales de la muestra no se dispersan tanto respecto a la media.

Tabla 16. Datos obtenidos del ensayo a compresión de HCF.

Descripción	Fábrica	Rotura	D1	D2	H1	H2	H3	Masa	Carga	Tipo de Falla
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	[kN]	
P.201	2023/06/28	2023/07/05	100,33	102,37	200,90	200,40	200,70	3610	132,25	5
P.202	2023/06/28	2023/07/05	100,60	101,52	220,00	200,00	200,00	3573	144,9	6
P.203	2023/06/28	2023/07/05	100,73	101,33	200,30	202,50	202,90	3524	127,35	5
P.204	2023/06/28	2023/07/26	101,90	101,50	199,63	200,88	200,83	3581	209,4	2
P.205	2023/06/28	2023/07/26	101,45	101,13	201,49	202,40	200,77	3597	229,25	2
P.206	2023/06/28	2023/07/26	101,88	103,62	199,70	199,34	199,60	3650	216,05	2

Elaborado por: Prado, A.

Tabla 17. Resistencia a la compresión f'_c de HCF.

Edad	D	Área	Resistencia compresión	Promedio	Desviación
(días)	(mm)	(cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
7	101,35	80,67	167,10	171,06	11,62
7	101,06	80,21	184,14		
7	101,03	80,17	161,93		
28	101,70	81,23	262,77	272,80	14,98
28	101,29	80,58	290,01		
28	102,75	82,92	265,60		

Elaborado por: Prado, A.

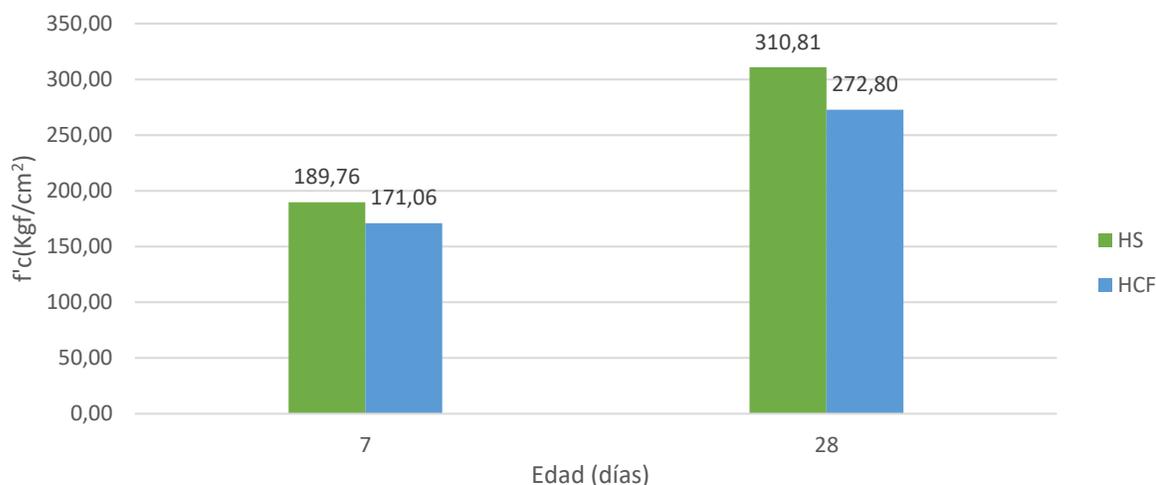


Figura 15. $f'c$ a diferentes edades de hormigón sin fibra y hormigón con fibra.

Elaborado por: Prado, A.

No obstante, al comparar estos valores en la **figura 15** se aprecia que existe una reducción de la resistencia del hormigón con fibra respecto al hormigón simple. Siendo el porcentaje más alto de reducción de 12,87% a los 28 días edad, como se muestra a continuación.

Tabla 18. % de aumento o disminución de $f'c$ con respecto al hormigón sin fibra.

Edad (días)	Resistencia a la compresión (kgf/cm ²)			
	Hormigón sin Fibra (HS)	Hormigón con Fibra (HCF)	Aumenta %	Disminuye %
7	189,76	171,06	-	9,85
28	310,81	272,80	-	12,87

Elaborado por: Prado, A.

3.1.5 Flexión

Se presentan datos obtenidos de los ensayos a flexión de vigas prismáticas rectangulares a los 7, 14 y 28 días de edad para hormigón simple, donde se analiza la carga máxima que es capaz de soportar antes de llegar a la fractura. Además, se aprecia que los valores de carga obtenidos se muestran muy cercanos entre sí, mostrando la carencia del hormigón a trabajar a tracción en su cara inferior.

Hormigón Simple (HS)

Tabla 19. Datos obtenidos del ensayo a flexión de HS.

DESCRIPCIÓN	FECHA DE FABRICA	FECHA DE ROTURA	ANCHO [mm]			ALTO [mm]			LUZ LIBRE (mm)	P MAX
			b1	b2	b3	d1	d2	d3	[L] [mm]	[N]
E.11	2023/06/28	2023/07/05	102,86	102,24	101,3	100,3	100,6	100,6	3510	10222
E.12	2023/06/28	2023/07/12	101,51	101,6	101,58	102,41	102,12	103,1	3530	10397
E.13	2023/06/28	2023/07/26	102,88	100,53	101,02	102,22	103,3	103,79	3540	10905

Elaborado por: Prado, A.

Hormigón con fibra (HCF)

Tabla 20. Datos obtenidos del ensayo a flexión de HCF.

DESCRIPCIÓN	FECHA DE FABRICACIÓN	FECHA DE ROTURA	ANCHO (mm)			ALTO (mm)			LUZ LIBRE (mm)	P MAX
			b1	b2	b3	d1	d2	d3	L	(N)
P101	2023/06/28	2023/07/05	101,63	101,90	102,83	101,74	101,62	100,31	348,00	10665,00
P102	2023/06/28	2023/07/05	100,83	100,24	100,91	101,50	102,31	100,54	349,00	8417,50
P103	2023/06/28	2023/07/05	100,24	100,97	99,84	100,75	101,63	101,59	352,00	8427,50
P104	2023/06/28	2023/07/26	101,78	101,50	101,36	101,43	101,76	103,67	350,00	11772,50
P105	2023/06/28	2023/07/26	99,65	99,60	99,91	102,06	102,75	103,71	351,00	11650,00
P106	2023/06/28	2023/07/26	101,31	101,61	101,49	101,63	101,86	102,46	352,00	13840,00

Elaborado por: Prado, A.

En la tabla que se muestra a continuación se puede observar que los valores individuales de la carga de las probetas no se dispersan mucho con respecto su media. Donde se puede apreciar un aumento en la capacidad de carga a flexión en las diferentes edades que se muestra si se analiza el promedio de estos.

Tabla 21. Valores promedio de carga máxima en el ensayo a flexión de HCF.

Edad	Hormigón simple		Hormigón con fibra			
	Descripción	P max [kN]	Descripción	P max [kN]	Promedio [kN]	Desviación [kN]
7	E.11	10,222	P101	10,6650	9,17	1,29
			P102	8,4175		
			P103	8,4275		
28	E.13	10,905	P104	11,7725	12,42	1,23
			P105	11,6500		
			P106	13,8400		

Elaborado por: Prado, A.

La **figura 16** muestra el comportamiento de las vigas a sus diferentes edades. Mientras que a los 7 días la capacidad de resistir carga en las vigas con fibras desciende, a los 28 días presenta un aumento respecto al hormigón simple. De este modo, la **tabla 22** muestra una reducción de carga del 10,29% a los 7 días, pero, un aumento de capacidad de 13,9% a los 28 días.

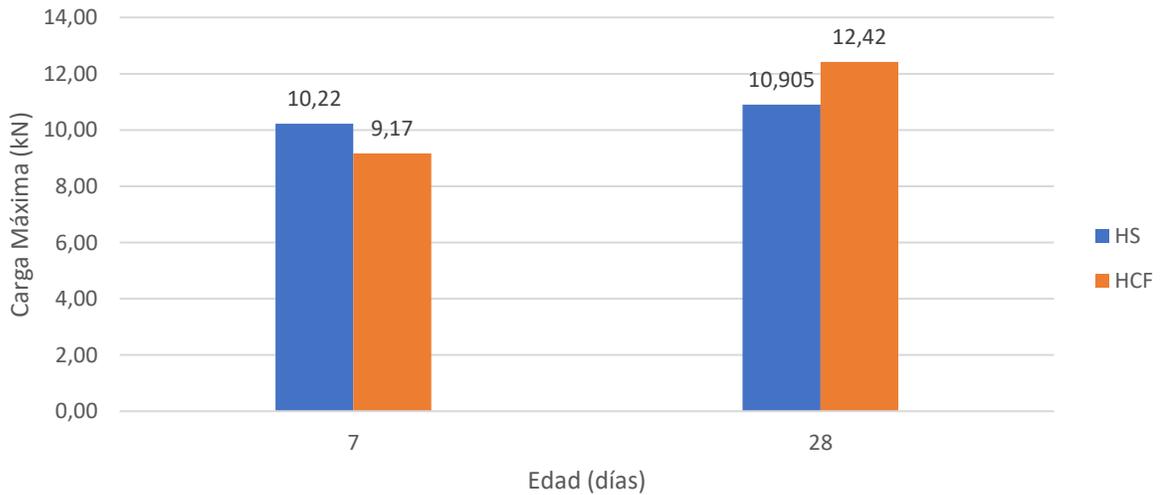


Figura 16. Carga máxima en vigas de HS y HCF

Elaborado por: Prado, A.

Tabla 22. % de aumento o disminución de carga máxima respecto al HS.

Edad (días)	Carga Máxima (kN)			
	Hormigón sin Fibra (HS)	Hormigón con Fibra (HCF)	Aumenta %	Disminuye %
7	10,22	9,17	-	10,29
28	10,91	12,42	13,9	-

Elaborado por: Prado, A.

Deflexión en vigas

El siguiente gráfico se obtuvo colocando el deformímetro en la parte central de la viga. El hormigón con fibra (HCF) presenta mayor capacidad de resistir carga a flexión, si se lo compara con el hormigón sin fibra (HS). Este ascenso en la capacidad de resistir carga se ve reflejado a su vez en la capacidad de la viga a tener mayor flecha. A pesar de que las deflexiones no distan mucho respecto al HS, estas existen al adicionar fibra.

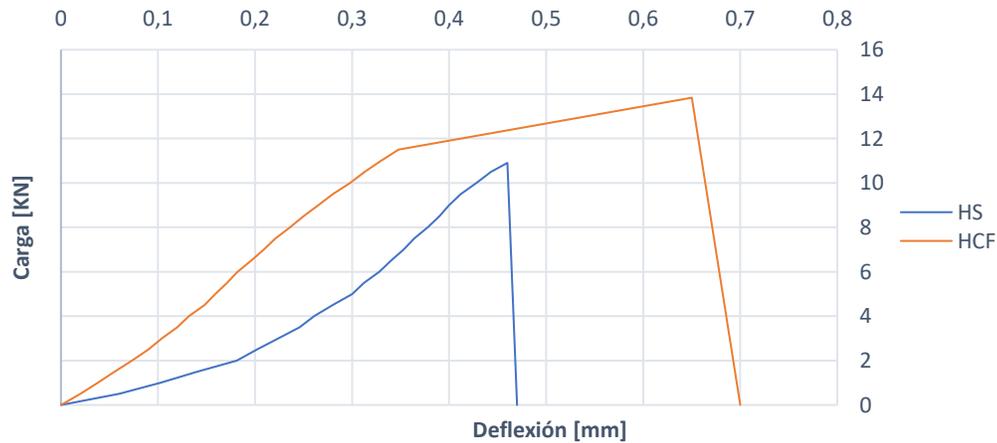


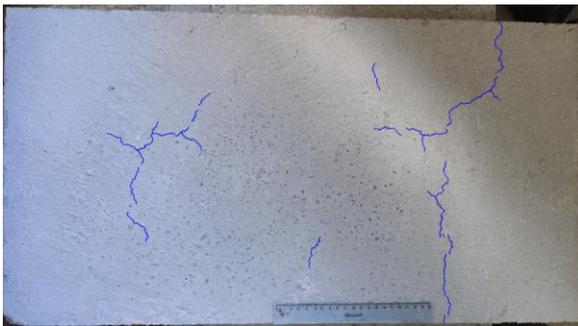
Figura 17. Carga vs deflexión en vigas de HS y HCF.

Elaborado por: Prado, A.

3.1.6 Placas o losetas

Las losetas de hormigón simple que se desarrollaron con la dosificación 3 muestran una clara aparición de grietas distribuidas en una buena parte de su superficie, las cuales son visibles a fácilmente. Estas grietas muestran una especie de distribución poligonal en algunos casos mientras que en otros tienen a distribuirse en su sentido más corto. En la **figura 18** se colocó una regla de 20 centímetros para evidenciar la longitud de las grietas. Se realizó una ligera variación en las dimensiones del encofrado de la loseta denominada como E. 33 a fin de observar si las grietas desaparecían en menores dimensiones. Sin embargo, las grietas persistieron. Finalmente, la **tabla 23** muestra la longitud de grietas contenidas en un centímetro cuadrado de superficie, que en promedio es $0,32 \left(\frac{mm}{cm^2}\right)$.

E.31



E.32



E.33



Figura 18. Fisuras en placas con dosificación 3.

Fuente: Prado, A.

Tabla 23. Longitud de grietas por centímetro cuadrado de superficie.

Descripción	Longitud de grietas (mm)	Área (cm^2)	Relación $\left(\frac{mm}{cm^2}\right)$
E. 31	1159	3000	0,39
E. 32	592	3000	0,20
E. 33	856	2400	0,36

Elaborado por: Prado, A.

Por otro lado, al analizar las profundidades de las grietas en estas losetas se encontró que la profundidad de estas no depende de que tal grande sea abertura. Existieron casos donde las fisuras fueron muy delgadas, pero con una profundidad considerable. Estos datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24. Profundidad de grietas en las losetas de HS.

Loseta E. 31			
Línea de medición N	Longitud a (cm)	Longitud b (cm)	Profundidad de grieta (cm)
1	2,2	1,7	1,93
2	2,6	2,7	2,5
3	1,7	3,4	2,5
4	1,4	2,7	1,94
5	1,6	2,4	1,95

Loseta E. 32			
Línea de medición N	Longitud a (cm)	Longitud b (cm)	Profundidad de grieta (cm)
1	2,8	3,9	2,5
2	2,1	3,3	2,5
3	1,6	1,9	1,74
4	2	2,9	2,4
5	1,8	2,5	2,12

Loseta E. 33			
Línea de medición N	Longitud a (cm)	Longitud b (cm)	Profundidad de grieta (cm)
1	1	3,2	1,78
2	2,2	2,8	2,48
3	3,1	2,1	2,5
4	1,8	3,4	2,47
5	1,7	3,1	2,29

Elaborado por: Prado, A.

Placas con fibra de hormigón con fibra (HCF)

Al monitorear la temperatura interna en las losetas de HCF muestra un descenso de esta a los 30 minutos de iniciado el experimento. Estos valores comienzan a incrementarse a los 60 minutos hasta llegar a un mismo valor final luego de 6 horas de ensayo de 64 °C como se muestra en la **figura 20**. Por el contrario, la velocidad interna del viento en la cámara muestra valores variables, con una tendencia descendente, como muestra la **figura 19**. Estos valores inician en un rango de entre 0,55 - 0,6 $\frac{m}{s}$ y llegan a bajar hasta los 0,44 – 0,42 $\frac{m}{s}$.

Las grietas en las placas con fibra de abacá al 0,5% resultaron nulas si se las compara con sus antecesoras hechas de hormigón simple. Incluso, realizando una inspección visual más cercana no se logró detectar la presencia de fisuras. La **figura 21**. muestra una superficie sin fracturas en todas las losetas analizadas con adición de fibra.

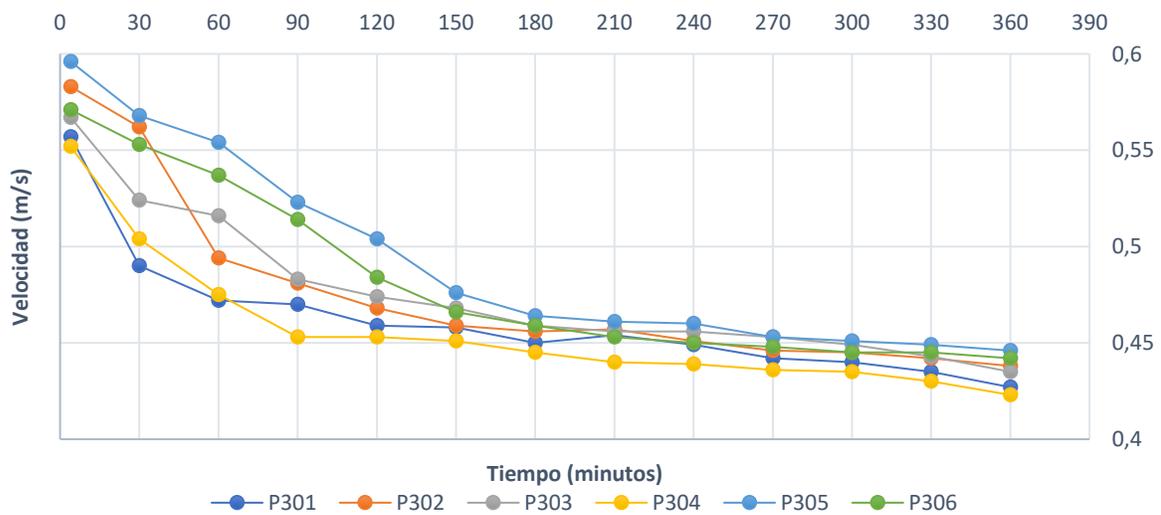


Figura 19. Velocidad de viento durante ensayos a placas en máquina de secado.

Elaborado por: Prado, A.

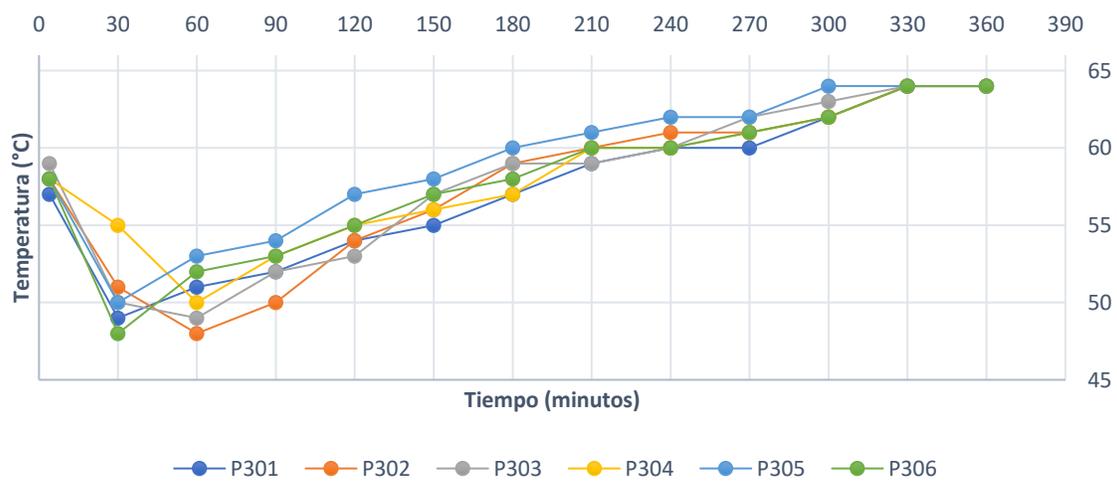


Figura 20. Temperaturas durante ensayos a placas en máquina de secado.

Elaborado por: Prado, A.

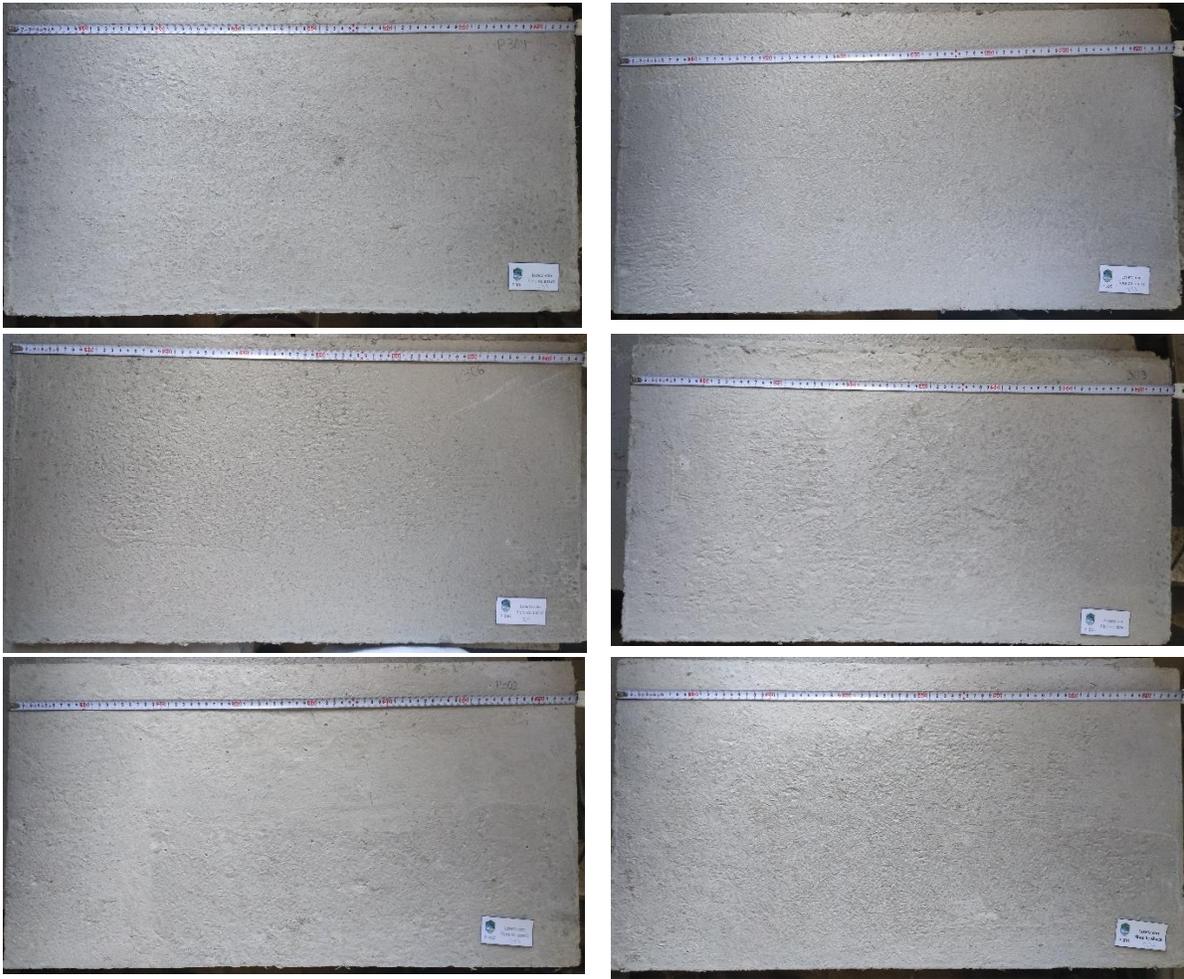


Figura 21. Superficie de placas P301, P302...P306.

Fuente: Prado, A.

3.2 CONCLUSIONES

- Se logra reducir la longitud de las grietas en la superficie de las losetas pasando de 1,156 metros a cero en el proceso de contracción al utilizar fibras naturales de abacá tratadas químicamente, de modo que se evidencia una correcta integración de este filamento en la matriz de hormigón, al mismo tiempo que la resistencia a compresión del hormigón no se ve sustancialmente comprometida.

- Se logra obtener una dosificación con una resistencia a la compresión superior a la establecida que al mismo tiempo permitió observar a simple vista la aparición de grietas, en elementos de hormigón simple.
- Cada hebra de la fibra vegetal de abacá presenta gran resistencia a la tracción en su estado natural. Se evidenció un ascenso en la capacidad a tracción, elongación y tenacidad posterior al tratamiento químico de hidróxido de sodio. Sin embargo, este tratamiento resultó fundamental para eliminar impurezas en la capa superficial de cada hebra que dio como resultado un aumento en la capacidad para soportar mayor carga a flexión.
- La fibra a pesar de haber sido tratada químicamente aún posee grandes capacidades absorbentes, por lo que la corrección de agua en la dosificación es clave para evitar que gran parte de la hidratación del cemento sea afectada.
- La reducción de resistencia a la compresión de los elementos con fibra se ve compensada con un aumento en la capacidad de resistir carga a flexión, esto podría resultar significativamente útil en aplicaciones no estructurales como contrapisos o aceras.
- Al existir un proceso de secado del hormigón sin una hidratación de curado, sumado a los cambios de temperatura que puede ocurrir en el ambiente y de velocidad de viento dan paso a la formación de grietas a temprana edad que pueden resultar nocivas para estructuras con acero de temperatura o refuerzo en general.

3.3 RECOMENDACIONES

- Debido a su gran capacidad de resistencia a la tracción, la fibra de abacá presenta buenos resultados al ser combinada con el hormigón, por lo que sería viable continuar la investigación y de esta manera dichos conceptos puedan ser aplicados a gran escala en un futuro en la industria de la construcción, para que se aplique a gran escala en un futuro ya que también es un material amigable con el ambiente.
- La fibra tiende a absorber aproximadamente el doble de su peso inicial, por lo que resulta fundamental realizar un ensayo de absorción de una muestra de fibra para adicionar la cantidad de agua necesaria, de modo que no afecte las propiedades del hormigón.

- Debido a las bondades para resistir flexión de los elementos de hormigón con fibra, sería posible aplicarlos en otros no estructurales, en donde predomine este tipo de esfuerzo como en contrapisos o aceras, reduciendo el costo de acero de temperatura.
- El Ecuador al ser un país productor y procesador del abacá facilita su acceso, lo que reduciría costos de importación, generando más fuentes de empleo.
- La fibra posterior al tratamiento con hidróxido de sodio presenta cierta capacidad absorbente, que se vio reducida al realizar un ensayo de absorción, por lo que resulta necesario tomar dos muestras distintas, una que sea la fibra para ingresar en la dosificación del hormigón y otra para que se realice el ensayo de absorción.
- De ser necesario un hormigón que no se reduzca su resistencia a compresión al añadir fibra, se podría optar por realizar los ensayos sin retirar la masa de abacá que se agrega al agregado grueso.

4. REFERENCIAS

- Acevedo, M. & Luna, M. (2021, June 4). TRATAMIENTOS QUÍMICOS SUPERFICIALES PARA EL USO DE FIBRAS NATURALES EN LA CONSTRUCCIÓN: CONCRETOS Y MORTEROS. Repositorio Universidad de Cartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/14644/TRABAJO%20DE%20GRADO%20ACEVEDO%20Y%20LUNA%2002-11-2021.pdf?sequence=1#:~:text=En%20la%20monograf%C3%ADa%20que%20se%20presenta%20a%20continuaci%C3%B3n%2C,relacionadas%20con%20procesos%20de%20escogencia%20de%20estos%20mismos.>
- ACI 318, (2019). Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural. American Concrete Institute.
- ACI 544.4R, (2018). Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete. 2-10.
- Acuña, J. (2007). Refinamiento y funcionalización de fibras naturales en el desarrollo de un material compuesto reforzado con fibras lignocelulosicas. Universidad de los Andes.
- Albinante Sandra R. Vasques Elen, B. & Yuan Leila L. (2012). Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. https://quimicanova.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=2908
- Amaguaña, M. & Guamán, L. (2023). Test Method for Studying the Shrinkage Effect under Controlled Environmental Conditions for Concrete Reinforced with Coconut Fibres. Materials MDPI, 32, 33.

- Armeccin, R., Sinon, F. & Moreno, L. (2014). Abaca Fiber: A Renewable Bio-resource for Industrial Uses and Other Applications. National Abaca Research Center, 108. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-07578-5_6
- ASTM C128, (2022). Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino. Compass.
- ASTM C136/C136M, (2019). Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.
- ASTM C2256/D2256M, (2021). Método de prueba estándar para propiedades de tensión de los hilos mediante el método de una hebra. Compass.
- ASTM C39/C39M, (2021). Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón., 8-12.
- ASTM C4848-98, (2018). Standard Terminology Related to Force, Deformation and Related Properties of Textiles. Compass.
- Asyraf, M.R.M., Ishak, M.R., Syamsir a, A., Nurazzi, N.M., Sabaruddin, F.A., Shazleen, S.S., Norrrahim, M.N.F., Rafidah, M., Ilyas, R.A., Zakir, M. & Razman, M.R.. (2022). Mechanical properties of oil palm fibre-reinforced polymer composites: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 33-65. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.122>
- Báez, F. & Pardo, S. (2015). *Concreto Reforzado Fundamentos*. ECOE, 1era Edición.
- Bittner, C. & Oettel, V. (2022). Fiber Reinforced Concrete with Natural Plant Fibers—Investigations on the Application of Bamboo Fibers in Ultra-High Performance Concrete. *Sustainability* , , 3, 4. <https://doi.org/10.3390/su141912011>

- Bossio, A., Lignola, G. & Monetta, T. (2016). Effects of Corrosion on Reinforced Concrete Structures. *World Heritage and Degradation*, 2, 3. https://www.researchgate.net/publication/301685463_Effects_of_Corrosion_on_Reinforced_Concrete_Structures
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2014, July 7). abaca. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/plant/abaca>
- Brunatti, C. (2014). La Industria del Cemento y la Sostenibilidad. Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, 9.
- Cai, M., Takagi, H., Nakagaito, Antonio N., Katoh, M., Ueki, T., Waterhouse, Geoffrey I.N.. & Li, Y. (2015). Influence of alkali treatment on internal microstructure and tensile properties of abaca fibers. *Crops and Products*, 65, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.048>
- da Costa, C. & Del Curto, B. (2014). Mechanical and Chemical Characteristics of Vegetable Fibers, and some Applications. *ResearchGate*, 2,3. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1046.8800do>
- Darwin, D., Dolan, C. & Nilson, A. (2016). *Desing of Concrete Structures*. Mc Graw Hill Education, Decimoquinta Edición, 25-29.
- Esguerra, Y. & Forero, L. (2020). CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE FIBRAS NATURALES PARA USOS EN CONCRETOS HIDRÁULICOS. Universidad de Cartagena. <http://dx.doi.org/10.57799/11227/7348>
- Faruk, O., Bledzki, Andrzej K., Fink, H., Sain, M., *Werkstofftechnik, I. & Recyclingtechnik, K.* (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in*

Polymer Science, 37(11), 1552-1596.

<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Gómez, Eddie F.. & Michel, Frederick C.. (2013). Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. *Degradation and Stability*, 98(12), 2583-2591.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.018>

Jimenez, A., Betancourt, S., Felisinda, P. & Cruz, L. (2009). Degradación térmica de fibras naturales procedentes de la calceta de plátano. (Estudio cinético). *ResearchGate*, 215.

https://www.researchgate.net/publication/264696689_Degradacion_termica_de_fibras_naturales_procedentes_de_la_calceta_de_platano_Estudio_cinetico

Kendra, S. (2014). *Textile Chemical Processing*. CBSE India. (pp 5).

<https://www.cbse.gov.in/publications/vocational/Textile%20Design/CBSE%20CIT%20Textile%20Chemical%20Processing-XII%20text.pdf>

Kim, K. & Lee, S. (1998). *PREDICTION OF DIFFERENTIAL DRYING SHRINKAGE IN CONCRETE*. Pergamon.

Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón: Guía didáctica para el Diseño de Mezclas*. Primera Edición. Quito: Editorial Edicumbre.

Maldonado, G. (2017). *Análisis de la efectividad en la retracción de concretos al adicionar ceniza volante y un aditivo compensador*. Universidad Nacional de Colombia.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK>

[Ewi9hKyrttuAAxXLRTABHZKjDdAQFnoECDoQAQ&url=https%3A%2F%2Frepositorio.unal.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2Funal%2F61013%2FTESIS%2520GGM](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK)

%2520APROBADA.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw0OJyKXqbYfaiCck6iLS6Bq&opi=89978449

Maurello, J., Mondragon, K. & Romero, J. (2020). PRINCIPALES TIPOS DE CONTRACCIÓN, EFECTOS SOBRE EL CONCRETO Y SUS MÉTODOS DE MITIGACIÓN. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 13, 28. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1374/Maurello%20Porras%20C%20Juan%20Felipe-2020%20.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Maya, J. & Sabu, T. (2008). Biofibres and biocomposites. Science Direct, , 343-364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>

McCormarc, J. & Brown, R. (2017). Diseño de Concreto Reforzado. Alfaomega, 10ma Edición.

Navidi, W. (2006). Estadística para Ingenenieros y Científicos . McGraw Hill, Primera Edición (772).

Passuello, A., Moriconi, G. & Shah, S. (2009). Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.004>

Polpaico, R. (2018, October 5). RETRACCIÓN PLASTICA. Polpaico. <http://www.polpaico.cl/wp-content/uploads/HDS-RETRACCI%C3%93N-PLASTICA.pdf>

Quevedo, D. [Dani Fer Quevedo] (11 de marzo de 2019). Fibra de abacá información [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=1BPN8gzs8zo>

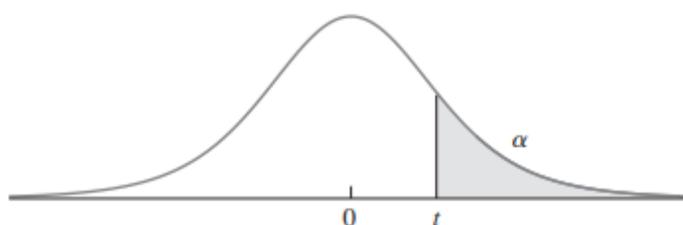
Safiuddin, M., Kaish, A., Woon, C. & Raman, S. (2018). Early-Age Cracking in Concrete: Causes, Consequences, Remedial Measures, and Recommendations. Applied Sciences.

- Salazar Jiménez, J. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*, Vol. N° 28 (130). <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- Saradar, A., Sadrumontazi, A. & Tahmouresi, B. (2017). Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). *ELSILVER*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.159>
- Šavija, B., Luković, M., Pacheco, J. & Schlangen, E. (2013). Cracking of the concrete cover due to reinforcement corrosion: A two-dimensional lattice model study. *Construction and Building Materials*, 44, 626-638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.063>
- Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE, (2016). *Estadística Básica.*, 10-13.
- Subramani, R. & Kumar, K. (2020). Behavior of Concrete using Steel Fiber as a Tensile Material. *ResearchGate*, 5-6. https://www.researchgate.net/publication/343106298_Behavior_of_Concrete_using_Steel_Fiber_as_a_Tensile_Material
- Tang, F., Zhang, H., Ji, X. & Wu, X. (2016). Effect of sand percent on early-age cracking behaviors of concrete. *Advances in Intelligent Systems Research*, 136, 41-43. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwir9N26rqOAAxXeTDABHQxOAQcQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.atlantis-press.com%2Farticle%2F25866777.pdf&usg=AOvVaw36--fnhMNVAfXbecq6hxNN&opi=89978449>

- Unidad Docente de Hormigón Estructural. (2009). Hormigón Armado y Pretensado. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Politécnica de Madrid, Edición N. 1, 3-11.
- Valle, P., Acosta, A. & Salvatierra, C. (2012). Agregados Utilizados en Obras Civiles Extraídos de la Cantera San Luis. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL, 2, 3. https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/20257/1/Tesis%20Cicyt%20_de_finitivo_pv.pdf
- Velásquez, S., Pelaéz, G., & Giraldo, D. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites: a review.
- Vijak, K. (2013). Green Composites from Natural Resources. CRC Press, 1era Edición. <https://doi.org/10.1201/b16076>
- Waller, V. & Wilsby, A. (2019). Abaca in the Philippines. KTH, Stockholm, Sweden, 5. <https://www.semanticscholar.org/paper/Abaca-in-the-Philippines-Berglund-Waller/038763725205ef844252273c08bb6f23a45d4518#citing-papers>
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S. & Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Pearson Education, Novena Edición, 246-250.

5. ANEXOS

Anexo 1: Puntos porcentuales superiores para la distribución t Student.



ν	α								
	0.40	0.25	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309	636.619
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850

Fuente: (Navidi, 2006)

Anexo 2: Densidad aparente de agregados.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



DENSIDAD APARENTE

Código de informe: DA-23-006-I
Fecha de informe : 2023-08-18

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: Carlos Andrés Prado Panata
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la dosificación al 0,5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
PROCEDENCIA: ***
TIPO DE MUESTRA: Indicadas
FECHA DE ENSAYO: 2023-02-16
NORMA: ASTM C29

DENSIDAD APARENTE DE AGREGADOS					
Identificación	Descripción	Muestra Suelta		Muestra Compactada	
		Densidad seca (kg/m ³)	Contenido de vacíos (%)	Densidad seca (kg/m ³)	Contenido de vacíos (%)
009-I-H-01	Arena	1521	41	1729	33
009-I-H-02	Ripio	1287	50	1426	45

Observaciones: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Villacís
JEFE DE LABORATORIO



Tel.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

Anexo 3: Contenido orgánico agregado fino.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



CONTENIDO ORGÁNICO

Código de Informe: CD-23-005-1
Fecha de informe: 2023-08-18

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: Carlos Andrés Prado Panata
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la dosificación al 0,5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
PROCEDENCIA: ***
TIPO DE MUESTRA: Arena
FECHA DE ENSAYO: 2023-02-16
NORMA: ASTM C40



Observaciones: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad.
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los (terro) ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Villacís
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Anexo 4: Gravedad específica y absorción de agregados.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS

Código de Informe: GSA-23-005-I
Fecha de informe: 2023-08-18

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: Carlos Andrés Prado Panata
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la dosificación al 0,5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
PROCEDENCIA: ***
TIPO DE MUESTRA: Indicada
NORMA: ASTM C127
FECHA DE ENSAYO: 2023-02-16

RESULTADOS DEL ENSAYO

Identificación	Descripción	Densidad relativa seca	Densidad relativa S.S.S	Densidad relativa aparente	Absorción de agua (%)
009-I-H-01	Arena	2,580	2,635	2,731	2,15
009-I-H-02	Ripio	2,581	2,639	2,740	2,24

Observaciones:

El término "Densidad relativa S.S.S" se refiere a la densidad de la muestra determinada bajo la condición saturada y superficialmente seca.
La información proporcionada por el cliente, tal como, procedencia y tipo de muestra, involucra su total responsabilidad.
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones del Laboratorio.
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.


Ing. Mercedes Villacis
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

Anexo 5: Granulometría agregado grueso.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

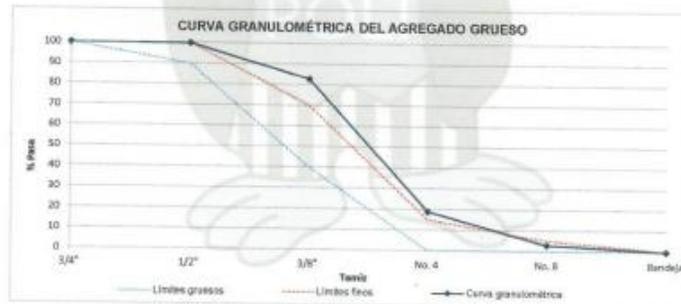
Código de Informe: GRG-23-001-I
Fecha de informe : 2023-05-18
Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE
Razón social: Carlos Andrés Prado Panata
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO
Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la dosificación al 0.5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***

MUESTRA: Agregado grueso - chispa 3/8"
PROCEDENCIA: ***
FECHA DE ENSAYO: 2023-02-16
NORMA: ASTM C136/C136M

Peso inicial (g)		10000,00	Número de Tamaño		7
Tamiz No.	Tamaño Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Que Pasa (%)
3/4"	19,00	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,50	1,9	0,2	0,2	99,8
3/8"	9,50	172,5	17,0	17,2	82,8
No. 4	4,75	648,4	63,9	81,0	19,0
No. 8	2,36	162,5	16,0	97,1	2,9
Bandeja	-	29,9	2,9	100,0	0,0
TOTAL		1015,2	Módulo de Finura	6,0	



Observaciones: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad.
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Vilacis
JEFE DE LABORATORIO



Tel.: 2976300
Ext.: 1609

E14-50

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

Anexo 6: Granulometría agregado fino.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Código de Informe: GRF-23-006-I
Fecha de Informe: 2023-08-18

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE

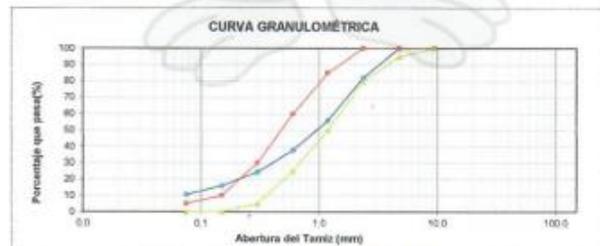
Razón social: Carlos Andrés Prado Panata
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la dosificación al 0.5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
MUESTRA: Agregado fino
PROCEDENCIA: ***
FECHA DE ENSAYO: 2023-02-16
NORMA: ASTM C136M

Tamiz No.	Tamaño Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
No. 4	4.750	0,0	0,0	0,0	100,0
No. 8	2.360	44,8	18,0	18,0	82,0
No. 16	1.180	65,0	26,1	44,0	56,0
No. 30	0.600	45,8	18,4	62,4	37,6
No. 50	0.300	32,9	13,2	75,6	24,4
No. 100	0.150	21,2	8,5	84,1	15,9
No. 200	0.075	13,0	5,2	89,3	10,7
BANDEJA	-	26,7	10,7	100,0	0,0
Total		249,4			

Observaciones: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los items ensayados bajo las condiciones de Laboratorio. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.



Ing. Mercedes Vilacis
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

Anexo 7: Ensayo de compresión de cilindros de hormigón sin fibra HS.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

Código de Informe: CC-23-005-I
Fecha de informe: 2023-08-18

Hoja 01 de 02

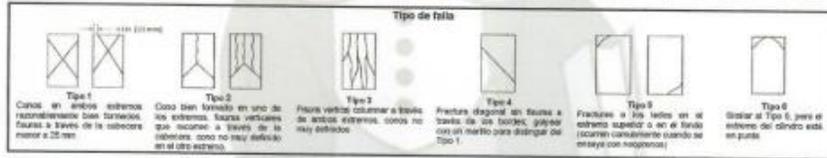
DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Carlos Andrés Prado Parata
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la destilación al 0.5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
ELEMENTO: Hormigón simple w/c=0.55
NORMA: ASTM C39

No.	Identificación	Fecha fabricación	Fecha rotura	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Peso* específico (kg/m ³)	Carga Máxima (kN)	Tipo de falla	Defectos	Resistencia	
											(MPa)	± U
1	HS-E-21	2023-06-28	2023-07-05	7	101,75	8131	2240	151,0	Tipo 2	A	18,6	0,02
2	HS-E-22	2023-06-28	2023-07-12	14	102,25	8211	2235	216,4	Tipo 2	A	26,3	0,02
3	HS-E-23	2023-06-28	2023-07-26	28	101,75	8131	2258	247,8	Tipo 5	A	30,4	0,03



Descripción de defectos: A = Ninguno; B = Segregado; C = Porosidad; D = Fisuras preexistentes; E = Otra.

Observaciones: Todos los datos del libro de ensayo (fecha de fabricación, elemento, identificación) son proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los items ensayados bajo las condiciones del Laboratorio.

U, expresado en MPa, representa la incertidumbre expandida de los resultados.

El tipo de falla y referencias corresponden a lo especificado en la norma ASTM C39.

Los parámetros que se encuentran señalados con (*) no se encuentran dentro del alcance de acreditación.

El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Jefe de Laboratorio



87-6-02
Versión 03

Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

Anexo 8: Ensayo de compresión de cilindros de hormigón con fibra HCF.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

Código de Informe: CC-23-005-I
Fecha de informe: 2023-08-18

Hoja 02 de 02

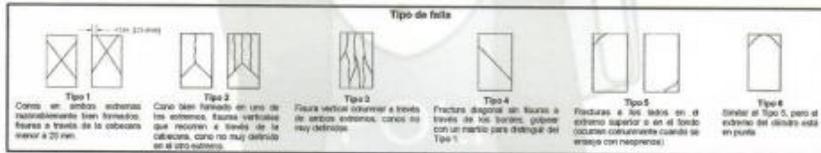
DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Carlos Andrés Prado Panata
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la dosificación al 0.5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
ELEMENTO: Hormigón con fibra
NORMA: ASTM C39

No.	Identificación	Fecha fabricación	Fecha rotura	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Peso* específico (kg/m ³)	Carga Máxima (kN)	Tipo de falla	Defectos	Resistencia	
											(MPa)	± U
1	HCF-P. 201	2023-06-28	2023-07-05	7	101,25	8062	2230	131,9	Tipo 5	A	16,4	0,02
2	HCF-P. 202	2023-06-28	2023-07-05	7	101,00	8012	2227	144,6	Tipo 6	A	18,0	0,02
3	HCF-P. 203	2023-06-28	2023-07-05	7	101,00	8012	2176	127,0	Tipo 5	A	16,6	0,02
4	HCF-P. 204	2023-06-28	2023-07-26	28	101,76	8131	2187	209,1	Tipo 2	A	26,7	0,02
5	HCF-P. 205	2023-06-28	2023-07-26	28	101,25	8062	2217	226,9	Tipo 2	A	26,4	0,03
6	HCF-P. 206	2023-06-28	2023-07-26	28	102,76	8292	2205	216,7	Tipo 2	A	26,0	0,02



Descripción de defectos: A = Ninguno; B = Segregado; C = Porosidad; D = Fisuras preexistentes; E = Otro.

Observaciones: Todos los datos del libro de ensayos (fecha de fabricación, elemento, identificación) son proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los tests ensayados bajo las condiciones del Laboratorio. U, expresada en MPa, representa la incertidumbre estadística de los resultados. (1) Tipo de falla y defectos corresponden a lo especificado en la norma ASTM C39. Los parámetros que se encuentren resultados con (*) no se encuentran dentro del alcance de acreditación. Los parámetros de las muestras resultadas con (*) no se encuentran dentro del alcance de acreditación. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Vilacis
JEFE DE LABORATORIO



F-04-08
Versión 03

Tel.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

Anexo 9: Ensayo de flexión en vigas de hormigón sin fibra HS y hormigón con fibra HCF.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

Código de Informe: CC-23-005-I
Fecha de Informe: 2023-08-18

Hoja 02 de 02

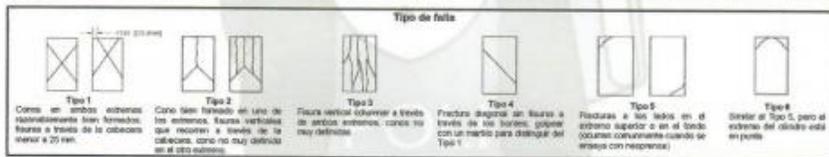
DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Carlos Andrés Prado Parota
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del hormigón con fibras naturales de Abacá como componente de la dosificación al 0.5% con tratamiento químico NaOH
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
ELEMENTO: Hormigón con fibra
NORMA: ASTM C39

No.	Identificación	Fecha fabricación	Fecha rotura	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Peso ^a específico (kg/m ³)	Carga Máxima (kN)	Tipo de falla	Defectos	Resistencia	
											(MPa)	f _{LU}
1	HCF-P-201	2023-06-28	2023-07-05	7	101,25	8052	2230	131,8	Tipo 5	A	16,4	0,02
2	HCF-P-202	2023-06-28	2023-07-05	7	101,00	8012	2227	144,6	Tipo 6	A	18,0	0,02
3	HCF-P-203	2023-06-28	2023-07-05	7	101,00	8012	2176	127,0	Tipo 5	A	16,8	0,02
4	HCF-P-204	2023-06-28	2023-07-26	28	101,75	8131	2187	209,1	Tipo 2	A	20,7	0,02
5	HCF-P-205	2023-06-28	2023-07-26	28	101,25	8052	2217	228,9	Tipo 2	A	23,4	0,03
6	HCF-P-206	2023-06-28	2023-07-26	28	102,75	8282	2205	216,7	Tipo 2	A	23,0	0,02



Descripción de defectos: A = Ninguno ; B = Segregado ; C = Porosidad ; D = Fausas presurizadas ; E = Ota.

Observaciones: Todos los datos del ítem de ensayo (fecha de fabricación, elemento, identificación) son proporcionados por el cliente por lo que implica su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensajados bajo las condiciones del Laboratorio.

U, expresada en MPa, representa la incertidumbre esperada de los resultados.

El tipo de falla y efectos corresponde a lo especificado en la norma ASTM C39.

Los parámetros que se encuentran resaltados con (*) no se encuentran dentro del alcance de acreditación.

Los parámetros de las muestras resaltadas con (*) no se encuentran dentro del alcance de acreditación.

El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Villaci
JEFE DE LABORATORIO



8-7-06
Versión 03

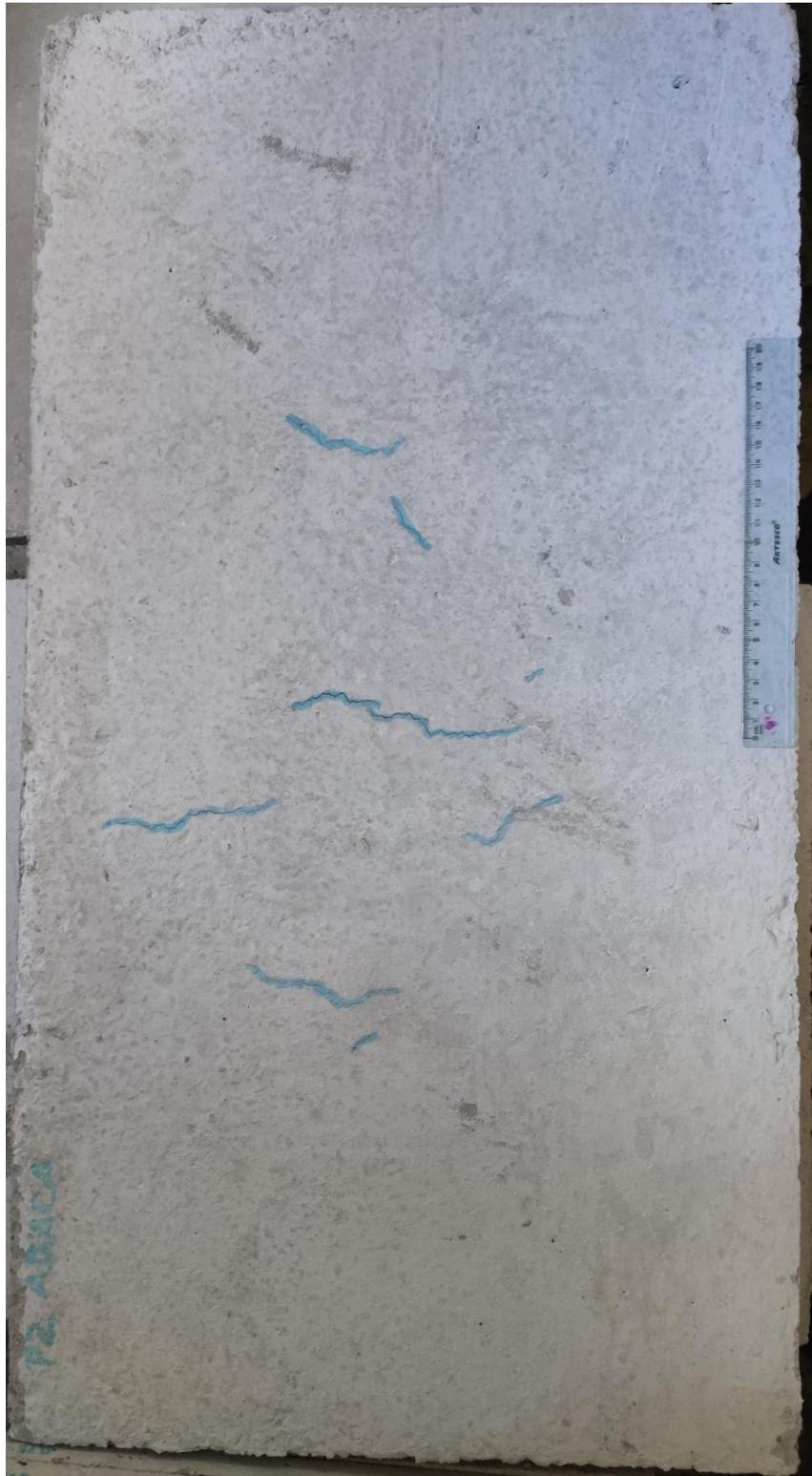
Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

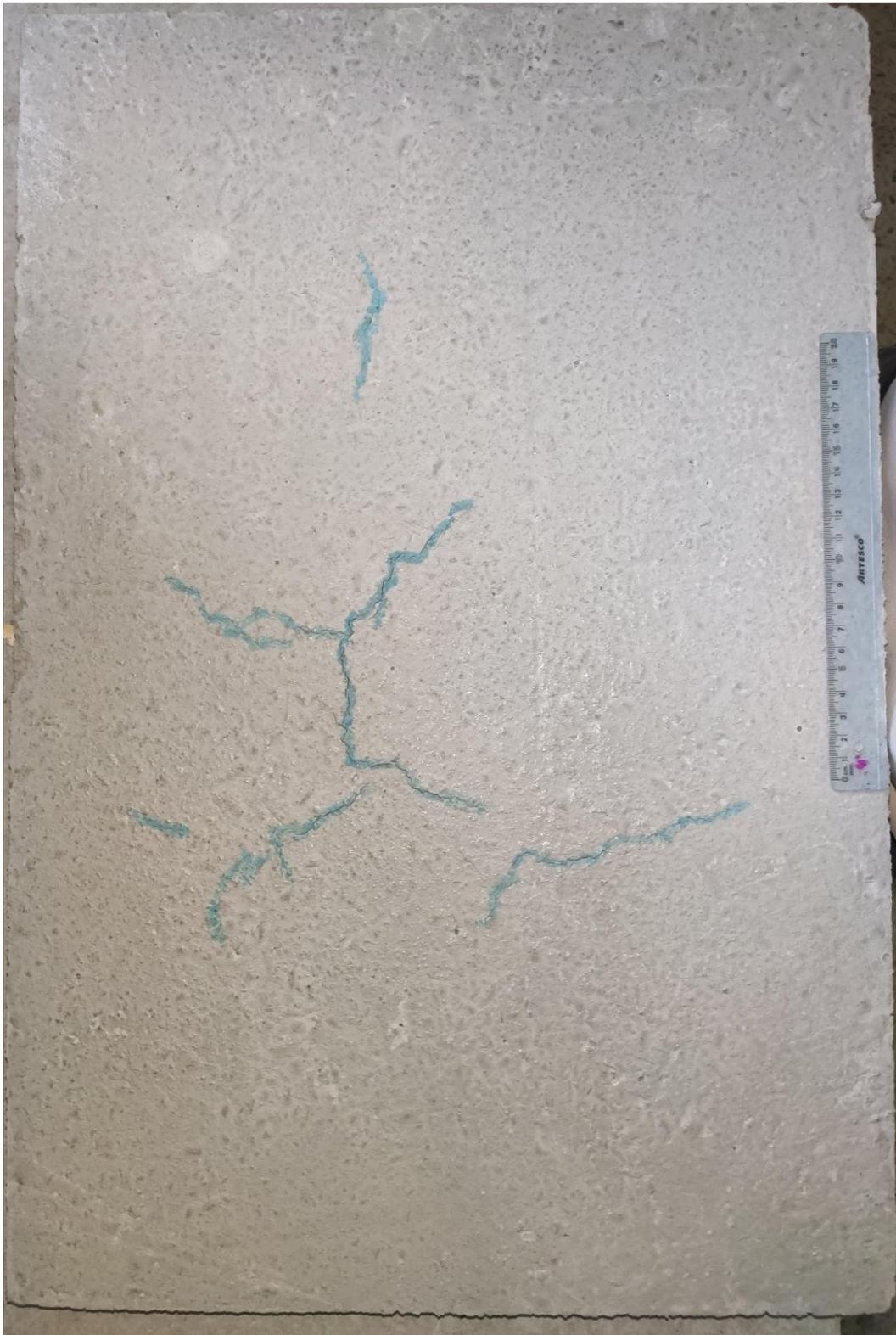
Anexo 10: Losetas de hormigon simple.



Loseta de hormigón E.31.

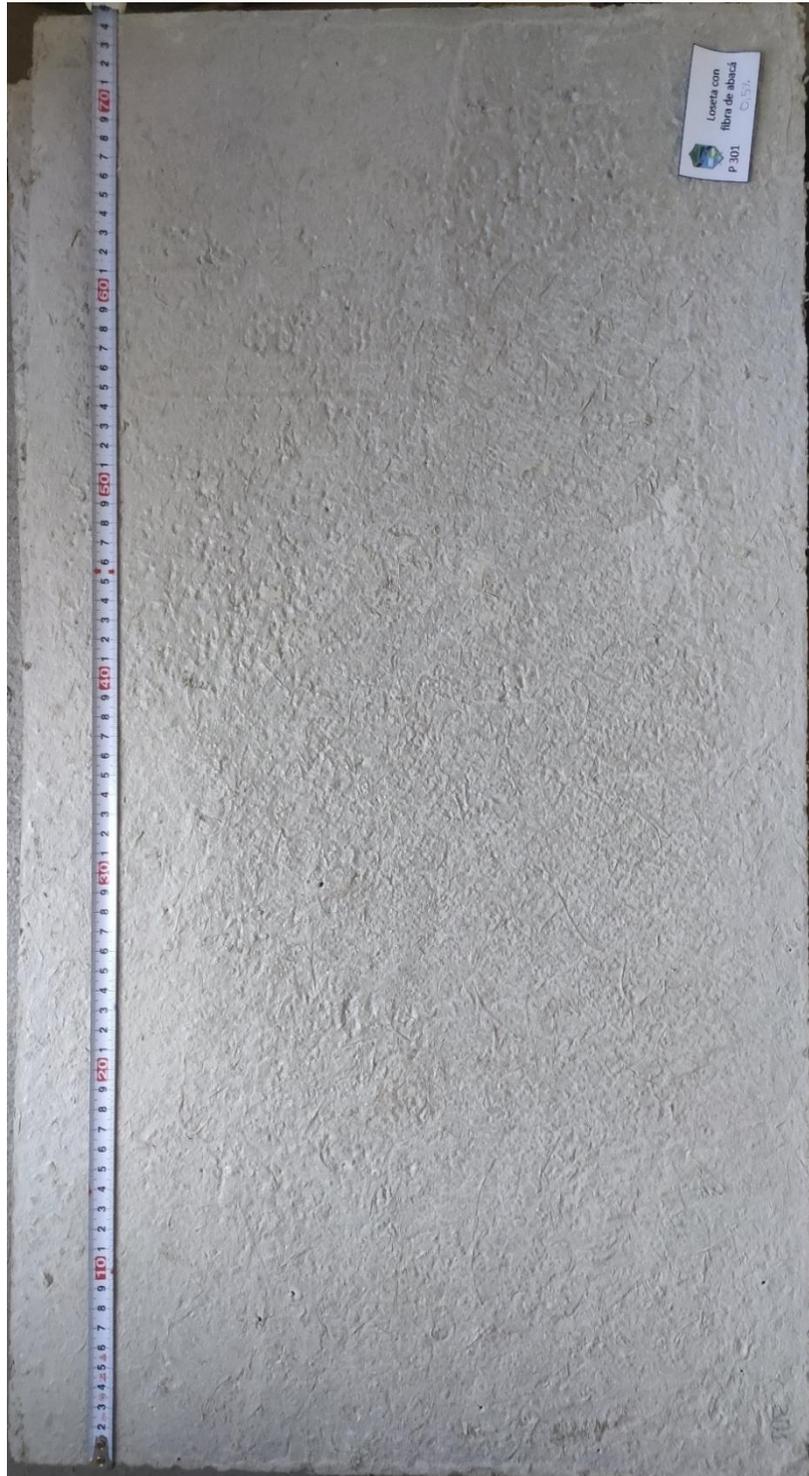


Loseta de hormigón E. 32.

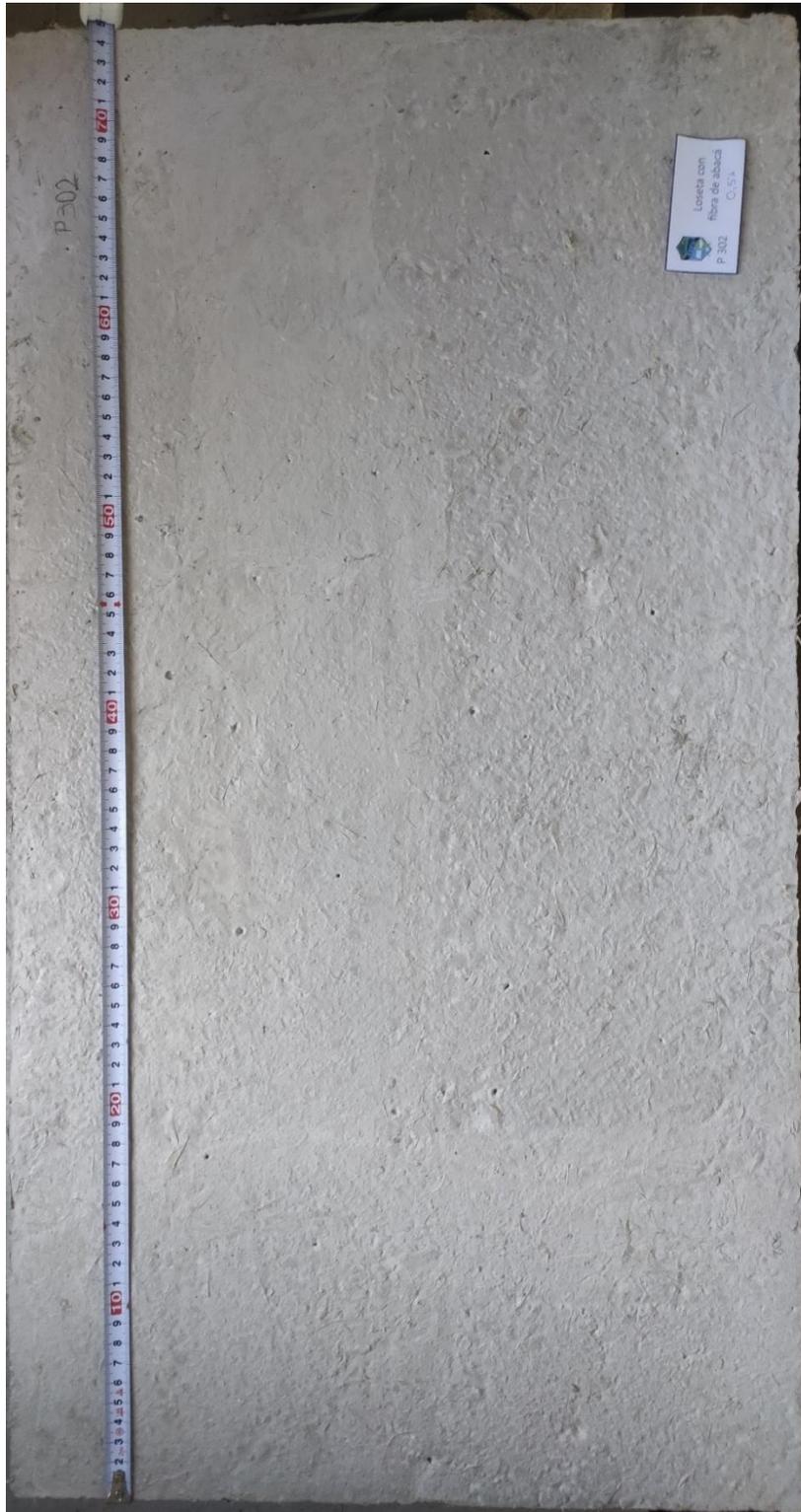


Loseta de hormigón E. 33.

Anexo 11: Losetas de hormigón con fibra HCF.



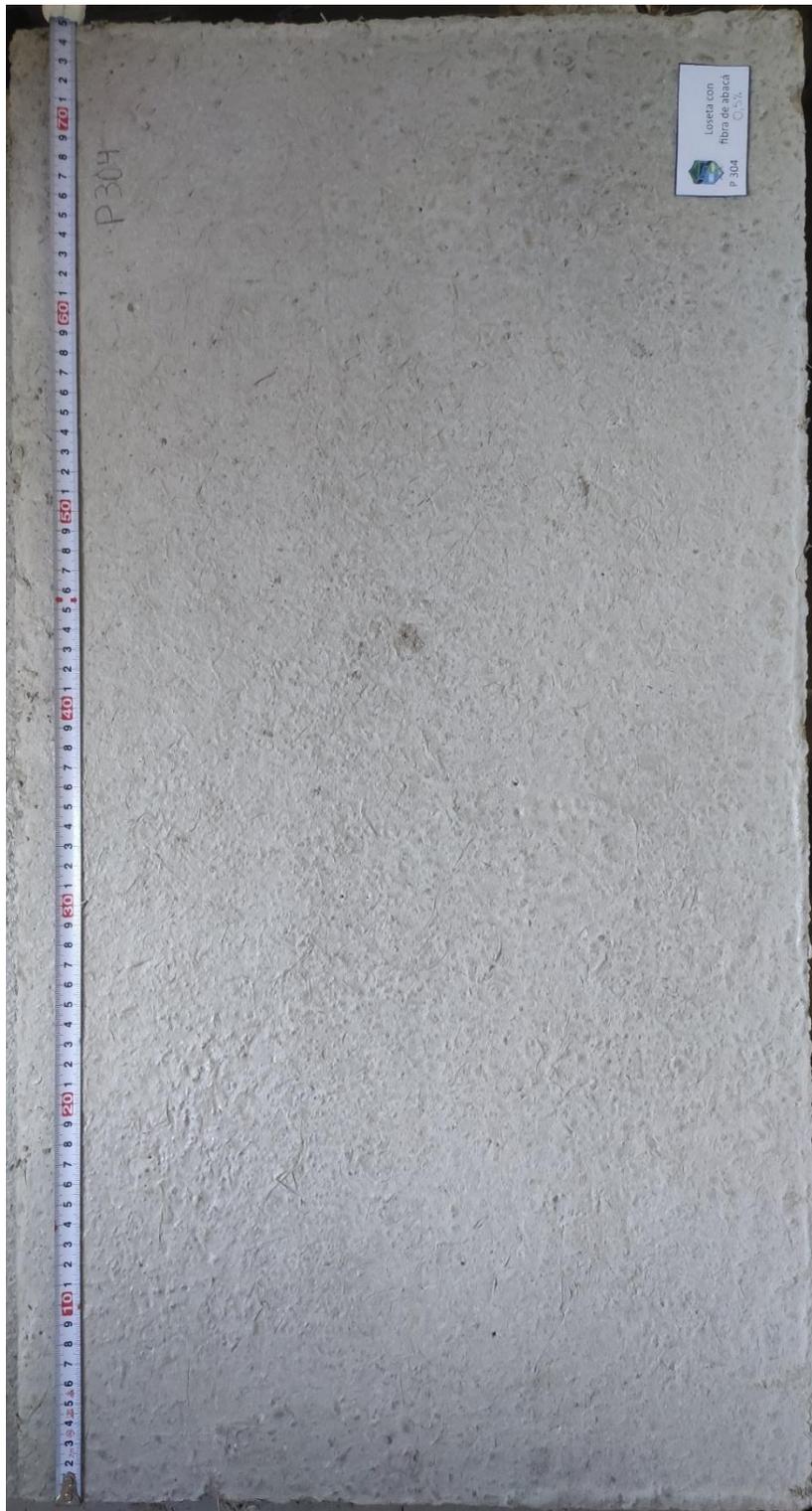
Loseta de hormigón con fibra P301. No presenta grietas.



Loseta de hormigón con fibra P302. No presenta grietas.



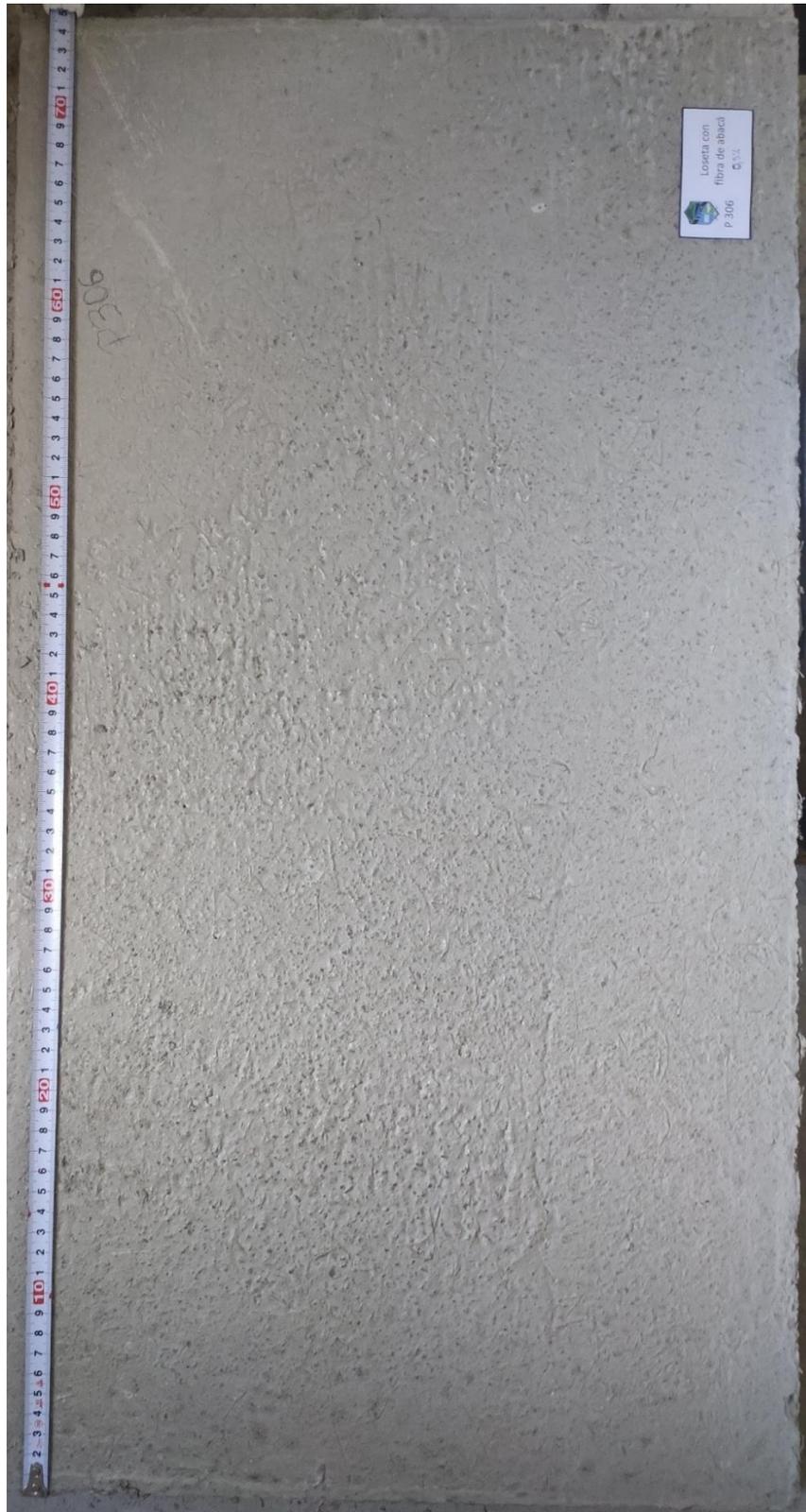
Loseta de hormigón con fibra P303. No presenta grietas.



Loseta de hormigón con fibra P304. No presenta grietas.

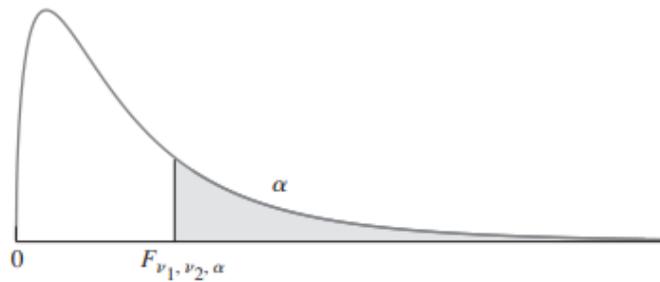


Loseta de hormigón con fibra P305. No presenta grietas.



Loseta de hormigón con fibra P306. No presenta grietas.

Anexo 12. Puntos porcentuales superiores para la distribución F.



v_2	α	v_1								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.100	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86
	0.050	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
	0.010	4052.18	4999.50	5403.35	5624.58	5763.65	5858.99	5928.36	5981.07	6022.47
	0.001	405284	500012	540382	562501	576405	585938	592874	598144	603040
2	0.100	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38
	0.050	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
	0.010	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39
	0.001	998.50	999.00	999.17	999.25	999.30	999.33	999.36	999.37	999.39
3	0.100	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24
	0.050	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
	0.010	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35
	0.001	167.03	148.50	141.11	137.10	134.58	132.85	131.58	130.62	129.86
4	0.100	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94
	0.050	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
	0.010	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66
	0.001	74.14	61.25	56.18	53.44	51.71	50.53	49.66	49.00	48.47
5	0.100	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32
	0.050	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
	0.010	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16
	0.001	47.18	37.12	33.20	31.09	29.75	28.83	28.16	27.65	27.24

Navidi, W. (2006).