

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CONCRETO
ADICIONADO CON FIBRA DE FIQUE A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA
TRACCIÓN, FLEXIÓN Y COMPRESIÓN.**

**CARLOS PINTO PRADILLA
LEIDY PATRICIA FIGUEROA QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES Y ESTRUCTURAS DE
CONSTRUCCIÓN INME
BUCARAMANGA
2016**

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CONCRETO
ADICIONADO CON FIBRA DE FIQUE A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA
TRACCIÓN, FLEXIÓN Y COMPRESIÓN.**

**CARLOS PINTO PRADILLA
LEIDY PATRICIA FIGUEROA QUINTERO**

**Trabajo de grado, presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Metalúrgico.**

Director:

**JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ
Ingeniero Metalúrgico, MS.c**

Co-director:

**RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ
Ingeniero Civil, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES Y ESTRUCTURAS DE
CONSTRUCCIÓN INME
BUCARAMANGA
2016**

AGRADECIMIENTOS

A Dios dador del soplo de vida; aliento diario para nuestra lucha.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirnos ser parte de su comunidad, por nuestra formación profesional.

A nuestro director y codirector de proyecto, Msc. Julián Herrera y PhD. Ricardo Cruz, por transmitirnos sus conocimientos, por el acompañamiento y la dedicación para que este proyecto de investigación fuera posible.

A la Escuela de Ingeniería Civil por el préstamo de las instalaciones y equipos necesarios para la realización de los ensayos propuestos en este trabajo y a sus técnicos de laboratorio, Jairo, Álvaro, Jaime y Herman por su colaboración permanente.

A la Doctora Viviana Güiza, por ella sabremos siempre que la grandeza se viste con dotes de humildad.

A nuestros calificadores, los ingenieros Afranio Cardona y Andrés González, por su tiempo y sus observaciones para la mejora de este trabajo.

A nuestras familias y amigos mil gracias por su cariño y constante apoyo.

DEDICATORIA

A mis padres y mis amigos; vivo por ellos; soy todo por ellos.

A mis padres y familiares por enseñarme la fuerza de voluntad, por enseñarme que la gloria aguarda al guerrero que muere en combate por los suyos, que ni la arena ni el sudor ni la sangre en la frente pueden doblegar al guerrero que cae y vuelve a levantarse empuñando su espada, porque aunque caiga, habla osadamente, de manera que su lugar nunca será entre las almas tímidas que no conocen victoria ni derrota.

A Leidy por ser piedra angular en mi vida como amigo y estudiante, por ser mi ángel de la guarda ininidad de veces, gracias amiga.

A todos mis amigos, mi alegría es por ellos; para ellos.

A Dios por darme vida cada mañana.

A Paola, por sembrar en mi sueños y metas.

A mis maestros, desde mi colegio hasta la universidad, soy estandarte de todos ellos.

A mi tierra; Bucaramanga; himno de lucha y perseverancia, siempre adelante, ni un paso atrás.

CARLOS PINTO PRADILLA

DEDICATORIA

A Dios por ser la guía en cada una de las etapas de mi vida, por demostrarme que su tiempo es perfecto y por poner en mi camino maravillosos momentos y extraordinarias personas.

A mi papá, Javier por todo su amor, por su dedicación, por ser mi amigo incondicional y por hacer de mis sueños los suyos, enseñándome que con dedicación y confianza todo es posible.

A mi mamá, Patricia por su infinito amor, por sus sacrificios en pro de mi felicidad, por ser ejemplo de perseverancia y por hacer de mí una mujer fuerte y soñadora,

A mi prima Yenny, por ser mí como mi hermana y brindarme tanto cariño y por siempre creer en mí.

A mi compañero de proyecto, Carlos por ser ejemplo de disciplina y entrega, por sus enseñanzas y sobre todo por su amistad.

A Cristian, por ese amor tan bonito, por su constante apoyo y por contagiarme su espíritu soñador, y a su familia, por acogerme tan especialmente en su hogar.

A mis amigos y compañeros de universidad, Erika, Tefa, Aidee, Maryi, Melisa, Claudia, Félix, Darwin e Ivan por permitirme ser parte de sus vidas y compartir con ellos esta etapa de nuestras vidas.

A mis amigos de colegio, Camilo, Mafe, Dayana y Viviana, por brindarme una amistad de tantos años y demostrar que el tiempo solo hace más fuerte nuestro vínculo.

LEIDY PATRICIA FIGUEROA QUINTERO

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo General	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	19
3.1 EL CONCRETO	19
3.1.1 Generalidades:.....	19
3.1.2 Ensayos destructivos y no destructivos en el concreto:	20
3.2 EL FIQUE.....	23
3.3 MATERIALES COMPUESTOS.....	25
3.3.1 Definición.	25
3.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras:.....	25
4. ESTADO DEL ARTE.....	28
5. METODOLOGÍA	31
5.1 ETAPA 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	32
5.2 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA FIBRA DE FIQUE.	32
5.3 ETAPA 3. FABRICACIÓN DEL CONCRETO	33
5.3.1 Actividad 1. Caracterización de la materia prima:	33
5.3.2 Actividad 2. Diseño de la mezcla:	33
5.3.3 Actividad 3. Fabricación de las muestras de concreto:	34

5.4 Etapa 4. EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO.....	35
5.4.1 Actividad 1. Ensayo no destructivo VPU:.....	36
5.4.2 Actividad 2. Evaluación de propiedades mecánicas de las muestras:	37
5.5 ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
6.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	39
6.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES	40
6.2.1 Ensayo de resistencia a la compresión:.....	41
6.2.2 Ensayo de resistencia a la tensión indirecta:	42
6.2.3 Ensayo de resistencia a la flexión:.....	45
6.2.4 Ensayo de Velocidad de pulso ultrasónico:.....	46
6.3 Correlación entre VPU y el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de fique:	48
7. CONCLUSIONES	51
8. RECOMENDACIONES.....	53
CITAS	54
BIBLIOGRAFIA	57
ANEXOS	58

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Materias primas básicas del cemento Portland.....	19
Tabla 2. Fases cristalinas presentes en el cemento.....	19
Tabla 3. Diferentes tipos de cemento portland.....	20
Tabla 4. Propiedades generales del cemento.....	21
Tabla 5. Composición de la fibra de fique.....	24
Tabla 6. Clasificación de los materiales compuestos.....	25
Tabla 7. Dosificación de la mezcla de concreto para probetas cilíndricas y viguetas.....	34
Tabla 8. Fuentes de variación del diseño de experimentos.....	34
Tabla 9. Distribución empleada para la realización de las mezclas en concreto simple sin adición y adicionado.....	36
Tabla 10. Parámetro de trabajo para mediciones de Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	36
Tabla 11. Caracterización de las propiedades mecánicas de la fibra de fique.....	40
Tabla 12. Resistencia a la compresión para probetas cilíndricas.....	41
Tabla 13. Resistencia a la tensión indirecta para concreto sin adición y con adición.....	43
Tabla 14. Módulo de rotura y deformación para viguetas.....	45
Tabla 15. Velocidad de pulso ultrasónico para concreto adicionado y no adicionado.....	47
Tabla 16. Relación de la resistencia a la compresión y VPU durante los 28 días de curado.....	48
Tabla 17. Correlación lineal de propiedades mecánicas vs VPU.....	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación esquemática de compuestos reforzados con fibras.....	26
Figura 2. Esquema de esfuerzos en una fibra embebida en una matriz.....	26
Figura 3. Flujograma de la metodología.....	31
Figura 4. Montaje para ensayo de resistencia a la tracción de la fibra de fique.....	34
Figura 5. Procedimiento de fabricación de las probetas.....	35
Figura 6. Ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	37
Figura 7. Montaje probetas para ensayos de compresión y tracción.....	38
Figura 8. Montaje viguetas para ensayo de flexión.....	38
Figura 9. Curva carga Vs alargamiento.....	40
Figura 10. Resistencia a la compresión para concreto simple y adicionado con fibra de fique.....	42
Figura 11. Probetas ensayadas a compresión.....	43
Figura 12. Resistencia a la tensión indirecta del concreto simple y concreto adicionado con fibra de 10 y 30 mm.....	44
Figura 13. Probeta de concreto adicionado con fibra de fique ensayada a tensión indirecta.....	44
La figura 14. Resistencia a la flexión de viguetas adicionadas y no adicionadas.....	46
Figura 15. Probeta de concreto adicionado con fibra de fique ensayada a flexión.....	46
Figura 16. Probeta de concreto simple ensayada a flexión.....	46
Figura 17. Velocidad de pulso ultrasónico para concreto adicionado y no adicionado.....	47
Figura 18. Correlación lineal de la resistencia a la compresión vs VPU.....	48
Figura 19. Resistencia a la tensión indirecta vs VPU.....	50
Figura 20. Resistencia a la flexión vs VPU.....	50

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Caracterización de la fibra de fique.....	58
ANEXO B. Resistencia a la compresión, a la tracción indirecta y VPU.....	61
ANEXO C. Resistencia a la flexión.....	70

RESUMEN

TITULO: DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CONCRETO ADICIONADO CON FIBRA DE FIQUE A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA TRACCIÓN, FLEXIÓN Y COMPRESIÓN.*

AUTORES: FIGUEROA QUINTERO, Leidy Patricia. PINTO PRADILLA, Carlos^{1**2}

PALABRAS CLAVE: fibra de fique, concreto adicionado, tiempo de curado, resistencia a la tensión, compresión, flexión, velocidad de pulso ultrasónico.

RESUMEN: Este trabajo de investigación presenta la influencia que tiene la adición de fibra de fique sobre el comportamiento mecánico del concreto y la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) del mismo. Esta investigación se llevó a cabo con el fin de determinar el efecto producido por adición de la fibra de fique (10 y 20 mm de longitud) sobre las propiedades mecánicas del concreto. Para lo anterior se fabricaron probetas de concreto con cemento Portland de uso general con resistencia de diseño de 25 MPa, relación agua/cemento de 0,5 y sustitución de agregado fino por 0.5% de fibra. Estas muestras fueron evaluadas en los días 3, 7, 14 y 28 de curado, mediante ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión, y la técnica de velocidad de pulso ultrasónico. La adición de fibra permitió observar cambios en las propiedades mecánicas estudiadas, presentando una disminución para la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta respecto al concreto simple, sin embargo el concreto adicionado presentó un comportamiento diferente, ya que al aplicar la carga máxima se observó una marcada adherencia entre la fibra de fique y la matriz del concreto, controlando así el desprendimiento del material y retardando la fractura total de la probeta ensayada, en cuanto a los resultados obtenidos para la resistencia a la flexión, se evidenció un aumento respecto al concreto sin adición, presentando un comportamiento similar al mencionado para los ensayos anteriores. Al emplear la técnica no destructiva de VPU se evaluó la capacidad de este ensayo para la detección de la fibra dentro de la matriz del concreto y correlacionarla con las propiedades mecánicas del mismo.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías físico químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Director: Ms.C Julián Herrera Ortiz. Codirector: Ph.D. Ricardo Cruz Hernández.

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF A CONCRETE ADDED WITH FIQUE FIBER FROM ITS TENSILE STRENGTH, BENDING AND COMPRESION.*

AUTHORS: FIGUEROA QUINTERO, Leidy Patricia. PINTO PRADILLA, Carlos**3

KEYWORDS: fique fiber, reinforced concrete, age of curing, tensile strength, compresion, blending, ultrasonic pulse velocity.

ABSTRACT: This research work presents the influence of the addition of sisal fiber on the mechanical behavior of concrete and ultrasonic pulse velocity (VPU) thereof. This research was conducted in order to determine the effect produced by addition of sisal fiber (10 and 20 mm long) on the mechanical properties of the concrete. For the above concrete specimens were made with Portland cement use general with design strength of 25 MPa, water / cement ratio of 0.5 and replacement of fine aggregate by 0.5 % fiber. These samples were evaluated at days 3, 7, 14 and 28 cured by testing compressive strength, indirect tensile and bending, and the technique of ultrasonic pulse velocity. The addition of fiber allowed to observe changes in the mechanical properties studied , showing a decrease for resistance to compression and indirect tensile compared to plain concrete , however the concrete added presented a different behavior , because by applying the maximum load was observed a strong adhesion between sisal fiber and concrete matrix , thereby controlling the release of the material and retarding the complete fracture of the specimen tested, as to the results obtained for flexural strength , an increase over the concrete without addition was evident , showing a behavior similar to that mentioned for the above tests. By employing nondestructive technique VPU ability of this assay for the detection of the fiber within the concrete matrix and correlate with the mechanical properties.

* Research Work

** Faculty of Physical Chemistry Engineering. Metallurgical Engineering School. Director: Ms.C Julián Herrera Ortiz. Codirector: Ph.D. Ricardo Cruz Hernández.

INTRODUCCIÓN

Se ha estudiado la adición de fibras naturales en el concreto con el fin de mejorar sus propiedades de resistencia a la tensión indirecta y flexión debido a que estos ya presentan buena resistencia a la compresión, con el fin de estudiar del concreto con adición; se utilizó fibra de fique, que es de bajo costo donde se estudió la respuesta del concreto en sus propiedades mecánicas principales luego de ser adicionada, además se realizó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico para relacionar su velocidad con las propiedades mecánicas.

En el presente trabajo de grado se presentará en el capítulo dos la fundamentación teórica donde se conceptualizan las principales características del concreto, fibra de fique y su trabajo en conjunto generando una relación de características. En el capítulo tres se presenta la metodología planteada para la resolución del problema, donde se aborda la caracterización de la fibra, el diseño y fabricación del concreto adicionado y no adicionado, lo anterior con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados, cabe resaltar las características heterogéneas del concreto como un factor de variabilidad considerable. En el capítulo cuatro se presenta el análisis de resultado del proceso experimental donde se recopilaron los datos obtenidos en la fase experimental y se correlacionaron diferentes pruebas con el fin de concertar argumentos para concluir frente a la problemática planteada al inicio.

Se ha determinado que las características mecánicas del fique aportan propiedades al concreto para mejorar su respuesta ante la resistencia a la tensión y la flexión, la velocidad de pulso ultrasónico como ensayo no destructivo detecta la presencia del fique en el concreto y logrando así mismo cuantificar sus propiedades mecánicas; además la adición de fique presentó características de falla propias de la matriz formada al ser adicionada al concreto en una longitud de 10 mm debido a que logró presentar un comportamiento estable de incremento en las propiedades mecánicas del concreto a medida que transcurría el tiempo de curado.

La adición de fibra de fique al concreto presenta una solución a la necesidad de mejorar las propiedades de resistencia a la tensión y flexión del concreto debido a que es una fibra natural que tiene un impacto favorable no solo en las propiedades características del concreto sino también a nivel ambiental debido a que el sector industrial así mismo se vería impactado positivamente de ser viable la utilización de fique como adición en el concreto portland tipo uno, así mismo la adición de fibra de fique genera cualidades en el concreto como una menor violencia al llegar al esfuerzo de falla y una capacidad de deformación mayor.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto ha sido durante muchos años uno de los materiales más utilizados en la construcción, esto se debe a su costo, fácil preparación y sobre todo por sus buenas propiedades como la resistencia a la compresión pero, se ha observado que no presenta buena resistencia a flexión, tensión y esfuerzos cortantes, se ha considerado el uso de materiales alternativos para obtener mejoras en las propiedades mecánicas de este material, como son las fibras naturales, para esta investigación la fibra a utilizar es la fibra de fique. De acuerdo con el Centro Regional de Estudios Económicos de Bucaramanga ^[9], el fique se cultiva en el país y en especial en los departamentos de Cauca, Nariño, Santander, Antioquia y Boyacá, donde Cauca aparece como el mayor productor con más de 7.000 toneladas al año, siendo la producción promedio anual para Colombia durante la última década, superior a las 20.000 toneladas, siendo un cultivo de economía campesina. De esta producción tan solo el 4% de la planta se aprovecha como fibra, la mayor cantidad está destinada a la manufactura artesanal, lo anterior es un preámbulo al fin social que se puede dar a la alianza entre la industria fiquera campesina y la industria cementera.

Jonny Jiménez ^[5], Sandra Pinzón ^[30], entre otros investigadores han venido desarrollando estudios acerca del uso de este tipo de fibra, encontrando que es una alternativa viable para ser utilizada como refuerzo del concreto, ya que los resultados obtenidos son satisfactorios en cuanto a la mejora en la resistencia a la flexión y esfuerzos cortantes aplicados, además de ser una fibra de fácil obtención y de bajo costo, con base en lo anterior se plantea la pregunta de investigación, ¿Qué efecto tiene la fibra de fique sobre las propiedades mecánicas de flexión, compresión y tracción de un concreto convencional? Este interrogante se resolverá a partir de la caracterización mecánica de la fibra de fique y de concreto reforzado con la fibra, fabricación del concreto, donde se tendrá en cuenta la caracterización de la materia prima, diseño de la mezcla y fabricación de las muestras de concreto para la respectiva evaluación de sus propiedades mecánicas mediante ensayos de tensión indirecta, compresión y flexión, además de la aplicación del ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

De ser favorables los resultados de este proyecto se podría comprobar que la utilización de las fibras naturales es una herramienta viable, generando beneficios para la industria de la construcción y para la industria fiquera ya que se le daría una aplicación diferente a la que se ha venido dando por años a la fibra de fique, además porque permite conocer el comportamiento del concreto cuando es reforzado con fibras naturales, también promueve la investigación en este tipo de material en el grupo de Investigación INME. Este proyecto está vinculado a un trabajo de investigación de doctorado cuyo fin es desarrollar un concreto convencional con adición de productos de fique para el empleo de estructuras en ambiente agresivo. De esta manera el proyecto que se plantea contribuirá con resultados parciales para la consecución de los fines de la investigación principal.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento mecánico de un concreto adicionado con fibra de fique a partir de su resistencia a la tracción, flexión y compresión.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características mecánicas de la fibra de fique mediante el ensayo de resistencia a la tracción.
- Evaluar las propiedades mecánicas del concreto adicionado con fibra de fique a partir de los ensayos de resistencia a la tracción, compresión y flexión.
- Relacionar el comportamiento mecánico del concreto reforzado con la fibra de fique con medidas del ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 EL CONCRETO

3.1.1 Generalidades: El concreto también llamado hormigón es un material compuesto formado por partículas dispersas (grava y arena) de gran tamaño (0.5 - 20 mm) SiO_2 en una matriz dura de silicatos y aluminatos (aglutinantes) que provienen de la hidratación del cemento (generalmente Portland) ^[4].

La pasta moldeable original se forma por la agitación física de las cantidades adecuadas de cemento Portland (~7-15 %), agua (~14-21 %), agregado fino o arena (24-30 %) y agregado grueso o grava (31-51 %). La pasta de cemento actúa en el hormigón como aglutinante y mantiene unidas las partículas. Este es un material compuesto formado por cerámicos y tiene una resistencia a la compresión de un orden de magnitud mayor que a tensión. La mejora de las propiedades de resistencia a la tracción se puede llevar a cabo mediante el refuerzo con barras de acero, fibras y aditivos ^[8]. Las materias primas básicas del cemento Portland y su origen se muestran a continuación en la tabla 1 y las fases cristalinas del mismo se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Materias primas básicas del cemento Portland.

MATERIAS PRIMAS	ORIGEN
Caliza (CaO)	Calcita de yacimientos, descarbonata del horno de clinquerizado.
Arena (sílice, SiO_2).	
Alúmina (Al_2O_3)	Yacimientos de aluminosilicatos (arcillas).
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	La tostación de piritas.

Tabla 2. Fases cristalinas presentes en el cemento.

FASES CRISTALINAS DEL CEMENTO	
NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA
Silicato tricálcico (C_3S)	$3CaO.SiO_2 \sim 60\%$
Silicato dicálcico (C_2S)	$2CaO.SiO_2 \sim 20\%$
Aluminato tricálcico (C_3A)	$3CaO.Al_2O_3 \sim 10\%$
Aluminoferrato tetracálcico (C_4AF)	$4CaO.Fe_2O_3 \sim 10\%$

Fuente: Fundamentos del concreto aplicados a la construcción. ICPC.

El cemento Portland se clasifica dependiendo de su composición química y sus propiedades físico químicas. Esta clasificación depende del país de producción, así

como de la normativa correspondiente. En Colombia está clasificado de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana (NTC) 121 [15]. Cemento Portland, como se muestra en la Tabla 3. La clasificación mostrada en la tabla 3 está de acuerdo a sus características, límites para cada uno de los componentes, resistencia a la compresión a las edades de 1 día y 28 días y algunas de las aplicaciones en diferentes tipos de estructuras.

Tabla 3. Diferentes tipos de cemento portland.

T I P O	CARACTERÍSTICAS	LÍMITES APROXIMADOS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA				EJEMPLO DE USO
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
UG	Uso general	40-55	25-30	3-15	5-10	Obra de concreto en general.
MRS	Resistencia moderada a los sulfatos y bajo calor de hidratación	40-50	25-35	8	10-15	Estructuras de drenaje. Muros de contención o cimentaciones masivas. Túneles y tuberías.
ARI	Altas resistencias iniciales	50-63	15-20	3-15	8-12	En estructuras donde se requiere colocar la obra al servicio con urgencia. En concretos pre-esforzados y prefabricados.
BCH	Muy bajo calor de hidratación	25-35	40-50	7	10-15	Estructuras como presas, donde el aumento de temperatura es un factor crítico resultado de un alto calor generado durante el endurecimiento.
ARS	Alta resistencia a los sulfatos	32-42	38-48	5	10	Para estructuras en suelos o en contacto con aguas subterráneas con un alto contenido de sulfato

Fuente: Fundamentos del concreto aplicados a la construcción. ICPC

En la tabla 4 se definen las características del cemento Portland y las normas técnicas colombianas bajo la cual se rige el ensayo de cada una de estas.

3.1.2 Ensayos destructivos y no destructivos en el concreto: Los ensayos destructivos y no destructivos son una herramienta eficaz para la determinación de la calidad del concreto mediante la evaluación de sus propiedades. Entre las pruebas destructivas se encuentran los ensayos de resistencia a la compresión, a la tracción indirecta y a la flexión, y la técnica de Velocidad de Pulso Ultrasónico como ensayo no destructivo.

Tabla 4. Propiedades generales del cemento.

CARACTERÍSTICA O PROPIEDAD	DEFINICIÓN	NORMA TÉCNICA DEL ENSAYO
Calor de hidratación	Es el desprendimiento de calor generado al ocurrir la reacción química del cemento con el agua durante el proceso de fraguado e inicio del endurecimiento.	
Peso específico	Relación entre el peso y el volumen absoluto que ocupa ese peso.	NTC 221
Peso litro (Densidad bulk)	Es la relación entre el peso de una muestra de cemento y el volumen relativo que este ocupa.	
Superficie específica o finura	Es una propiedad física que está relacionada con el tamaño de los granos de cemento o con el área superficial de los mismos, influye en el calor de hidratación, la tasa de adquisición de resistencia y otros.	NTC 121
Consistencia normal	Se mide sobre la pasta de cemento y se refiere al grado de firmeza que tenga la misma teniendo en cuenta que varía de acuerdo a la cantidad de agua agregada.	NTC 110
Tiempo de fraguado	Es el tiempo que tarda la pasta de cemento en volverse rígida desde su preparación.	NTC 118.17
Estabilidad de volumen o sanidad	Es la propiedad de la pasta endurecida en donde esta debe conservar su volumen después del fraguado, sin que sufra aumentos ni contracciones debido a los esfuerzos de tensión internos que se pueden producir.	NTC 107
Resistencia	Se evalúa el comportamiento del cemento frente a las propiedades de compresión, tensión y flexión, siendo la resistencia a la compresión la más importante.	NTC 120 (Flexión) NTC 220 (compresión)

Fuente: <http://repository.ugc.edu.co/handle/11396/1137>

- **Resistencia a la compresión.** La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en MPa.

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango

prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen. Los valores obtenidos dependerán del tamaño y la forma del espécimen, la dosificación, procedimientos de mezclado, los métodos de muestreo, moldeo, fabricación y de la edad, temperatura, y las condiciones de humedad durante el curado. Los resultados de este método de ensayo son usados como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado, y colocación del concreto; determinación del cumplimiento de las especificaciones; control para la evaluación de la efectividad de aditivos; y usos similares ^[24]^[12].

- **Ensayo de resistencia a la tracción:** El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper. Este método de ensayo consiste en aplicar una fuerza de compresión diametral a lo largo de la longitud del espécimen cilíndrico de concreto a una velocidad que está dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. Esta carga induce esfuerzos de tracción sobre el plano que contiene la carga aplicada y esfuerzos de compresión relativamente altos en el área inmediatamente alrededor de la carga aplicada. Ocurre más bien la falla por tracción, en vez de la falla por compresión porque las áreas de aplicación de carga están en un estado de compresión triaxial, permitiendo de ese modo soportar esfuerzos de compresión mucho más altos que los que estarían indicados por un resultado de ensayo de resistencia a la compresión uniaxial. La máxima carga sustentada por el espécimen es dividida por factores geométricos apropiados para obtener la resistencia a la tracción indirecta ^[28]^[25].

- **Ensayo de Flexión:** Este método de ensayo cubre la determinación del esfuerzo de flexión del concreto utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz. El método de carga en los tercios de la luz, debe ser utilizado al realizar ensayos de flexión de concretos, utilizando bloques de aplicación de carga que aseguren que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara del espécimen y sean aplicadas sin excentricidad.

Los resultados se calculan e informan como el módulo de ruptura. El esfuerzo determinado puede variar si existen diferencias en el tamaño del espécimen, preparación, condición de humedad, curado o las condiciones donde la viga haya sido moldeada o aserrada al tamaño requerido. Los resultados de este método pueden ser usados para determinar el cumplimiento de especificaciones o como una base para determinar el proporcionamiento de la mezcla y las operaciones de mezclado y colocación del concreto. Este ensayo se utiliza en la evaluación de concretos para la construcción de losas y pavimentos ^[19].

- **Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU):** El uso generalizado de los ensayos destructivos y no destructivos está dirigido al diagnóstico preliminar del elemento de concreto en estudio, sobre todo en estructuras de dudosa calidad. Esta es la razón

por la que puede afirmarse que los ensayos no destructivos constituyen una etapa previa del estudio. Una vez llevados a cabo, pueden estudiarse las zonas más afectadas del elemento a través de ensayos destructivos y con ello, emitirse consideraciones más concluyentes.

Esta técnica tiene sus bases en la teoría de propagación de ondas en un medio sólido, homogéneo, isótropo y elástico. De la física ondulatoria se conoce, que la velocidad de propagación de las ondas en un medio de características conocidas, depende principalmente de la densidad y de las características elásticas del medio por el que esta se desplaza.

- **Influencia de las condiciones de prueba:** La velocidad de pulso ultrasónico en el concreto puede ser influenciada por los factores que se exponen a continuación:

Contenido de agua. El valor de la velocidad de pulso puede aumentar o disminuir significativamente según el contenido de agua, es decir incrementa en condiciones de saturación, sin embargo las variaciones en la resistencia a compresión es significativo.

Relación agua/cemento. Puesto que es la relación agua/cemento quien determina parte de las características del concreto, su efecto sobre la técnica de velocidad de pulso ultrasónico es inversamente proporcional, ya que a medida que disminuye la relación, los valores de velocidad de pulso aumentan, debido a que la cantidad de agua presente en la mezcla es mejor, lo que disminuye el porcentaje de porosidad en el material, evitando la dispersión de las ondas ultrasónicas y por lo tanto, tomando menos tiempo en el recorrido de la trayectoria.

Cantidad y tipo de agregados. Se ha demostrado que tanto la cantidad como el tamaño de agregado afectan considerablemente las reacciones de hidratación y la trayectoria de la onda, generando variaciones en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico para concretos con una misma relación de agua/cemento.

Edad del concreto. A medida que transcurre el tiempo sigue la hidratación del cemento, disminuyendo la porosidad y propagándose las ondas más rápido en el medio sólido; es decir el efecto de la edad del concreto en la velocidad de pulso es similar a los efectos sobre la resistencia del concreto.

3.2 EL FIQUE.

El fique es una planta grande, de tallo erguido, su altura varía entre 2 y 7 metros, densamente poblado de hojas de color verde, en forma radial, largas (1 a 3 metros), angostas (10 y 20 cm), carnosas, puntiagudas, acanaladas y dentado espinosas, en algunas variedades, presentando líneas o estrías tenues de unos 3 mm de largo;

las plantas jóvenes consisten en un rosetón de hojas gruesas, carnosas de color verde azulado, a medida que la planta crece, se desarrolla en la base un tronco corto que lleva de 75 a 100 hojas cuya longitud varía de 150 a 200 cm y su anchura de 15 a 20 cm en la parte más ancha cerca de la mitad, angostándose a 10 cm cerca de la base, la cual tiene un espesor de 6 a 8 cm. Su flor es de color blanco verdoso, llamada maguey o escapo, sólo florece una vez en su ciclo de vida y luego le sobreviene la muerte (magueciada) [3].

Las semillas germinan en la misma planta y sus propágulos (bulbillos caen ya formados al suelo por lo que se considera al fique una planta vivípara [7]. Su vida útil (producción de fibra, jugos, etc.) comienza entre los 3 y 6 años, dependiendo de las condiciones que enfrente. La fibra extraída apenas constituye un 4% máximo del peso total de la hoja. También constituye la estructura principal de las paredes celulares del tejido vegetal y está compuesta por celulosa, y algunas impurezas como ligninas y pigmentos (tabla 5). Cada filamento está constituido por fibrillas elementales soldadas entre sí por una goma (lignina). Los extremos de las fibrillas se sobrepone para formar filamentos multicelulares a lo largo de la hoja y son éstos los que conforman la fibra de fique.

Tabla 5. Composición de la fibra de fique.

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
Cenizas	2,6
Fibras	1,58
Pentosas	17,65
Lignina	12
Celulosa	62,7

Fuente: <http://repository.ugc.co/handle/11396/1173>

Según la Revista Internacional de Contaminación Ambiental [27] la fibra del fique representa, aproximadamente, el 5 % del peso de toda la planta, mientras que el porcentaje restante corresponde mayoritariamente al zumo (70 %), la estopa y el bagazo (25 %), los cuales aún son manejados, en la mayoría de los casos, como residuo sin valor. El extracto de la hoja es una suspensión de características variables que son dependientes de la edad de la planta, la estación del año y las características del suelo. Presenta un color verde ocre y es de olor fuerte. La densidad media es cercana a los 1.02 kg/L, con un pH variable entre 4 y 5. De forma cualitativa está conformado por: agua (85 %), celulosa (6 % D-glucosa), materia orgánica y amorfa (8 % constituida por sacarosa, proteínas, nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, saponinas y sapogeninas) y minerales (1 %) [2].

3.3 MATERIALES COMPUESTOS

3.3.1 Definición. Los materiales compuestos son aquellos formados por dos o más materiales que al combinarse apropiadamente presentan propiedades físicas superiores a las de sus constituyentes individualmente, los materiales compuestos están formados por dos fases; una fase continua denominada matriz y otra fase dispersa denominada refuerzo. El refuerzo proporciona las propiedades mecánicas al material compuesto y la matriz actúa como ligante; matriz y refuerzo se encuentran separados por la interfase. En la tabla 6 se muestra la clasificación de los materiales compuestos ^[14].

Tabla 6. Clasificación de los materiales compuestos.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	
Según la forma	Composites fibrosos Composites particulados Composites estructurales
Según la naturaleza	Composites de matriz orgánica Composites de matriz metálica Composites de matriz cerámica
Según el tamaño de la fase dispersa	Microcomposites Nanocomposites

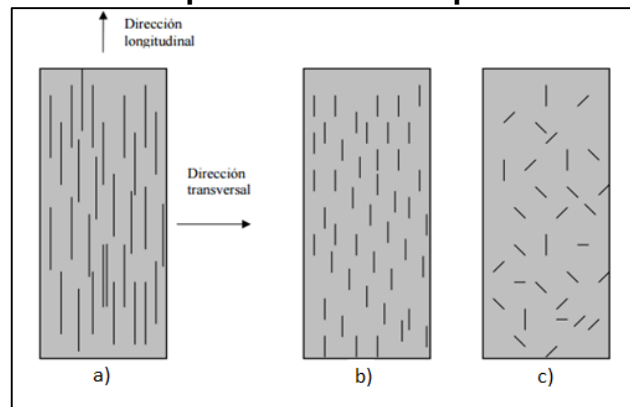
Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>

3.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras: Los materiales compuestos con fases dispersas en forma de fibras son muy utilizados actualmente y a menudo se diseñan con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad. Estas características se expresan mediante los parámetros de resistencia específica y módulo específico, que corresponden, respectivamente, a las relaciones entre la resistencia a la tracción y el peso específico y entre el módulo de elasticidad y el peso específico. Utilizando materiales de baja densidad, para la matriz y para las fibras, se fabrican compuestos reforzados con fibras que tienen resistencias y módulos específicos excepcionalmente elevados. A continuación se presentan los criterios a tener en cuenta cuando se fabrican materiales compuestos adicionados con fibras.

3.3.2.1 Influencia de la orientación de las fibras: Las fibras de refuerzo se pueden introducir en la matriz con diversas orientaciones como lo son las fibras cortas que aportan un comportamiento isotrópico u homogéneo en el material, también al añadir las con longitud variable en un ordenamiento unidireccional se obtienen propiedades anisotrópicas con resistencia y rigidez paralelas a las fibras, así mismo

las propiedades de estos materiales se pueden diseñar para soportar diferentes condiciones de cargas si se controla su longitud y orientación [10]. Ahora bien, se puede afirmar que las mejores propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras se consiguen cuando las fibras están uniformemente distribuidas como se observa en la figura 1.

Figura 1. Representación esquemática de compuestos reforzados con fibras.

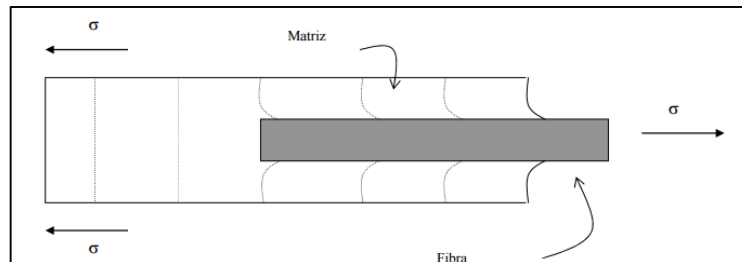


- a) Continuas y alineadas, b) discontinuas y alineadas, c) discontinuas y orientadas al azar.

Fuente: <https://ingenierosenapuros.files.wordpress.com/2012/02/g-capitulo-9-materiales-compuestos.pdf>

3.3.2.2 Influencia de la longitud de la fibra: Al examinar los esfuerzos que se presentan en los extremos de una fibra hipotética embebida en una matriz como se muestra en la figura 2, los esfuerzos de tensión en la fibra disminuyen desde el esfuerzo nominal hasta cero (0) en el extremo de la fibra, ya que en el extremo no hay transmisión de carga desde la matriz.

Figura 2. Esquema de esfuerzos en una fibra embebida en una matriz.



Fuente: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13552/pfg%20completo.pdf?sequence=1>

El esfuerzo cortante en la interfase matriz-refuerzo se incrementa desde un valor correspondiente al esfuerzo cortante nominal hasta un valor máximo cerca del extremo de la fibra. La parte de la fibra en la que se presenta este proceso se denomina $\frac{l_c}{2}$ (l_c : Longitud crítica), y representa la longitud de fibra que es inefectiva con relación a la tensión a la que está sometido el material, ya que los esfuerzos que soporta la porción del extremo de la fibra son menores que los esfuerzos nominales. Puesto que cualquier fibra tiene dos extremos, una fibra de refuerzo deberá de ser más larga que l_c para poder ser efectiva. Dicho de otra manera, las fibras discontinuas en un compuesto deben ser mayores que l_c si se quiere maximizar la capacidad de carga de dicho compuesto.

Aunque existen muchos factores que afectan estos esfuerzos, como son la forma de las fibras, la geometría de los extremos, los módulos elásticos y de cortante respectivos de la fibra y la matriz y la resistencia de la interfase matriz-refuerzo.

La longitud crítica (l_c) de fibra se puede expresar de la siguiente manera:

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{\tau_c}$$

Dónde:

l_c : Longitud crítica.

d : Diámetro de la fibra (m).

σ_f : Resistencia a tracción de la fibra (MPa).

τ_c : Resistencia de la unión matriz fibra (resistencia a la cizalladura de la matriz) (MPa).

3.3.2.3 Influencia del porcentaje de adición de la fibra de fique: La relación de la dosificación porcentual de fibra difiere para cada caso de estudio, dependiendo principalmente del tipo de fibra, longitud y volumen, también de la proporción de los otros materiales; dando como resultado que una alta cantidad de fibra dificulta el mezclado y las fibras tienden a apelmazarse, generando inadecuada adherencia lo que disminuye su resistencia [3].

3.3.2.4 Unión y rotura: Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz para que la carga se transfiera correctamente de la matriz a las fibras. Si la unión es pobre, las fibras pueden salir de la matriz durante la carga, reduciendo la resistencia y la resistencia a la fractura del compuesto. En algunos casos, para reforzar la unión se pueden utilizar recubrimientos especiales.

4. ESTADO DEL ARTE

El concreto ha sido un material de suma importancia en la historia de la humanidad, siendo empleado en diferentes sectores de la construcción. Se ha pensado en la obtención de elementos prefabricados que sean económicos y de fácil instalación, obtener concretos más ligeros sin tener que sacrificar condiciones técnicas ni propiedades importantes de este.

En la actualidad se ha desarrollado con mayor fuerza la posibilidad de obtener nuevas alternativas pensando en reducir el impacto ambiental, optando por materiales renovables, garantizando así su obtención a futuro, como lo son las fibras naturales. A continuación se presentan estudios que se han llevado a cabo a cerca de este tipo de materiales, específicamente de la fibra de fique.

Cesar Juárez (2002) ^[6], realizó su estudio de investigación en concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (agave de lechuguilla), como materiales para construcción en México, comprobando que los concretos reforzados con fibras naturales tienen el potencial para ser usados como materiales de construcción económicos, teniendo en cuenta que este tipo de fibras tienen las propiedades físico mecánicas adecuadas para este tipo de aplicación, como lo son su resistencia última a la tensión y su flexibilidad, lo cual les permite ser consideradas como posible refuerzo en el concreto. Se observó que las fibras largas con 0.5% en volumen del concreto, tienen la capacidad de soportar mayores cargas de tensión y flexión en comparación con el concreto simple, además de permitir un comportamiento dúctil del concreto después del agrietamiento de la matriz.

Guillermo Parra y Marco Parra (2007) ^[29], estudiaron el comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra, encontrando que la fibra de fique es un material que tiene alta resistencia a la tensión, llegando a soportar esfuerzos de hasta 1400 MPa, teniendo en cuenta que esta resistencia depende del diámetro de la fibra, a mayor diámetro promedio mayor es la carga que puede soportar, entonces al adicionarla al concreto y el mortero resultará un material compuesto con alta resistencia a la tensión y flexión. Con respecto a los esfuerzos de adherencia concluyeron que estos se presentan hasta una profundidad aproximada de 2 cm., pues después de esta profundidad la fuerza de adhesión es mayor que la resistencia a tensión del fique y entonces la fibra no se desprende de la matriz, sino que falla la fibra de fique. En cuanto a propiedades de esta fibra, el valor aproximado de su módulo de elasticidad es de un valor aproximado a los 9000 MPa, lo cual indica que este material es bastante deformable y se puede decir que presenta un comportamiento elástico, pues para cargas pequeñas la deformación no es permanente.

Luiz Roma, Luciane Martello y Holmer Savastano (2008) ^[32], evaluaron el rendimiento mecánico, físico y térmico de los azulejos a base de cemento

reforzados con fibras vegetales, obteniendo como resultado que el rendimiento térmico mostró que tejas reforzadas con fibras vegetales son aceptables como sustitutos de hojas de fibrocemento que todavía están en uso en varios países en desarrollo. En el caso de propiedades físicas el contenido de fibra era más importante para el comportamiento compuesto que el tipo de refuerzo. Para las propiedades mecánicas, el tipo de fibra fue la variable principal como los mejores resultados se conectan al compuesto que estuvo reforzado solamente por 3% en masa de sisal pulpa. La superioridad de la fibra sisal-cemento fue más evidente para la dureza de azulejos bajo flexión.

Romildo Toledo, et al (2009) ^[34], llevaron a cabo su investigación acerca de la durabilidad de moldeado por compresión de laminados de mortero reforzados con fibra de sisal (el sisal es una fibra natural que pertenece a la familia del fique), encontrando que la fragilización a largo plazo de las láminas de fibra de sisal y cemento puede evitarse completamente mediante el uso de una matriz de cemento libre de hidróxido de calcio. Para ensayos realizados a muestras libres de CH sometidas hasta 100 ciclos de humedecimiento y secado presentaron resistencia al post agrietamiento y tenacidad tan altos como los de las muestras de referencia. La formación de grietas múltiples observado en las muestras durante los ensayos de flexión, la longitud retirada de fibra larga en la superficie de fractura de las muestras analizadas y el análisis micro estructural indicó que las fibras de sisal no sufrieron ningún procesos de mineralización cuando se utiliza como refuerzo en la matriz libre de CH.

Jonny Jiménez (2011) ^[5], en su trabajo de investigación acerca del uso de materiales alternativos (fibra de fique) para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, obtuvo resultados en los que se evidenció que la resistencia a la compresión disminuyó en los tipos de adición 1.0% y 1.5%, siendo la de mejor resistencia la de más volumen de fibra, entonces al querer obtenerse ganancia en la resistencia a la flexión se debe sacrificar resistencia a la compresión, sin embargo, esta pérdida trae consigo una mejor unión en la matriz de concreto en donde las fibras transmiten una mejor distribución de las cargas axiales. Para la obtención de un mejor mezclado de la fibra es recomendable utilizar longitudes entre 2 cm y 5 cm para que no ocurra aglomeración y haya una buena distribución y así lograr que la matriz de concreto sea mucho mejor.

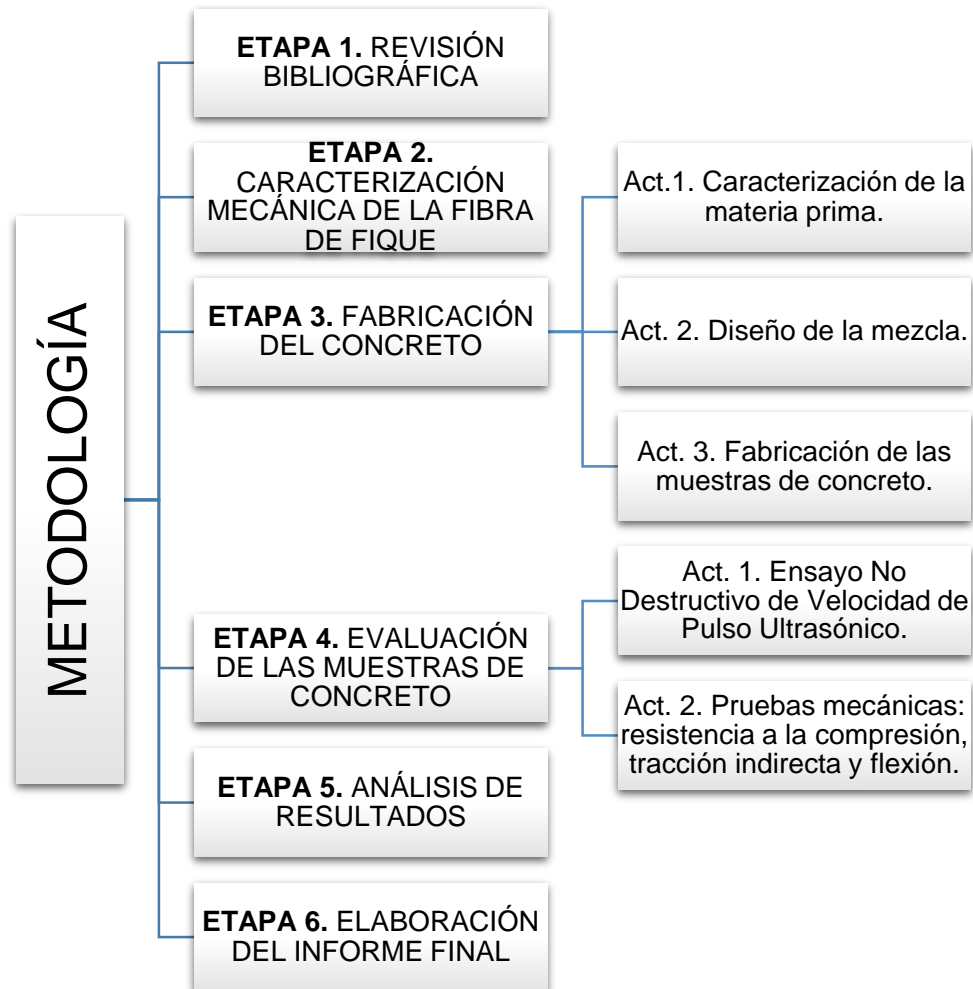
Sandra Pinzón (2013) ^[30], en su estudio del análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique, con respecto a la resistencia a la compresión determinó que el porcentaje óptimo para la adición de esta fibra al concreto es de aproximadamente 3.3 Kg/m^3 de concreto. También se encontró que los contenidos de fibra de fique adicionados al concreto no causan ni producen mayor resistencia a la compresión en ninguna de las probetas cilíndricas analizadas, aunque se evidenció que al incrementar porcentajes de fibra por encima del 0.5% se presentaron disminuciones considerables en la resistencia a la compresión y en su densidad haciendo al concreto más liviano y propenso a la falla. En cuanto a la

resistencia a la flexión se vio que los contenidos de fibra de fique no causaron aumento en esta propiedad pero sí se obtuvo capacidad de cohesión, observándose que aun fracturada la viga, la fibra seguía adherida a la matriz de concreto hasta que se separaron los dos fragmentos de la viga por acción de la presión.

5. METODOLOGÍA

En la figura 3 se muestra un flujograma, en el cual se mencionan las etapas que se llevaron a cabo en este trabajo de investigación, las cuales serán explicadas a continuación de este.

Figura 3. Flujograma de la metodología.



5.1 ETAPA 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Durante la realización de esta investigación se estudió información encontrada en libros, artículos, tesis, trabajos de grado, revistas, entre otros, encontrados en bases de datos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander correspondiente al concreto reforzado con fibras de fique y su influencia sobre las propiedades mecánicas tales como tracción indirecta, flexión y compresión y al ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Con esta información fue posible determinar las variables a tener en cuenta durante este proceso como lo fueron la longitud de fibra de fique y el tiempo de curado, los avances alcanzados por otros autores en dicho tema y el comportamiento que podría presentar de las pruebas realizadas a las muestras.

5.2 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA FIBRA DE FIQUE.

La caracterización mecánica de la fibra de fique se llevó a cabo realizando el ensayo de resistencia a la tracción a probetas compuestas por 20 fibras de 15cm de longitud efectiva (Figura 4), esta longitud es la distancia medida entre las mordazas de la máquina universal de ensayos Tinius-Olsen con celda de carga de 25KN que pertenece al grupo de investigación GIMAT de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, el ensayo se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM D3822 ^[14], utilizando velocidad de carga 1mm/min y rango de carga 350N. Los resultados obtenidos se utilizaron para la determinar propiedades de la fibra de fique tales como el módulo de elasticidad, resiliencia, porcentaje de deformación y carga máxima alcanzada por este. Adicionalmente se calculó la densidad de la fibra según lo establecido en la norma ASTM D1577-07 ^[13], utilizando manojos de veinte (20) fibras, variando la longitud de estas desde 60 a 150 mm.

Figura 4. Montaje para ensayo de resistencia a la tracción de la fibra de fique.



5.3 ETAPA 3. FABRICACIÓN DEL CONCRETO

5.3.1 Actividad 1. Caracterización de la materia prima: Los materiales utilizados en la fabricación de las muestras de concreto fueron:

Agregado grueso, agregado fino, cemento Portland de uso general y agua potable, a continuación se presenta la caracterización de cada uno de ellos.

Agregado grueso y fino: Para la fabricación de las probetas de concreto se utilizó como agregado grueso, grava y como agregado fino, arena provenientes del municipio de Bocas, Santander. Para la caracterización de estos materiales se determinó el peso específico, mas unitaria y vacíos entre las partículas (NTC 92) [26], densidad y absorción (NTC 176 [17] y NTC 237 [18]). Después de lavar y secar los agregados se llevó a cabo el análisis granulométrico para determinar el módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo del agregado grueso, utilizando para la arena tamices número 4, 8, 16, 30, 50 y 100 y para la grava tamices número $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ".

Cemento: Se utilizó cemento Portland de uso general, el cual cumple con los requisitos fisicoquímicos contemplados en las normas NTC 121 [15] y NTC 321 [20]. Se lleva a cabo esta caracterización con el fin de determinar su densidad para el diseño de la mezcla, la cual tuvo un valor de $3,08 \text{ g/mm}^3$.

Agua: El agua que se empleó para la fabricación fue agua potable, la cual cumple según la norma NTC 3459 [22] con los requerimientos básicos de cantidad de ácidos, cloruros, sales, carbonatos, sulfatos y demás sustancias que puedan tener efecto negativo sobre el comportamiento ideal de la mezcla. Se empleó agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

5.3.2 Actividad 2. Diseño de la mezcla: Con los datos obtenidos en la actividad anterior se realizó el diseño de la mezcla con base al código ACI (American Concrete Institute) 211.1 [11]. El diseño de mezcla para 25 MPa se desarrolló teniendo en cuenta los días de curado de las muestras (3, 7, 14 y 28 días), con relación de agua/cemento igual a 0.5, para 24 probetas cilíndricas de dimensiones $200 \times 100 \text{ mm}^2$ (seis (6) probetas por día de ensayo) y $1,647 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de volumen, a las cuales se les realizaron pruebas de compresión y tensión indirecta y, 8 probetas de dimensiones $350 \times 100 \times 100 \text{ mm}^2$ (dos (2) por días de ensayo) y $3,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de volumen para la prueba de flexión. Adicionalmente se tuvo en cuenta la adición de la fibra de fique con porcentaje de 0.5% y longitudes de 10 y 30 mm.

En la tabla 7 se presenta la dosificación para la fabricación de 24 probetas cilíndricas y 12 viguetas con geometría rectangular. Se tomó como base de cálculo 1 m^3 de concreto, teniendo en cuenta que para la mezcla con adición de fique el reemplazo de la cantidad de este se hace respecto a agregado fino (0,5%). A partir de esta tabla se utilizaran las siguientes abreviaciones, CS: concreto simple, CF10: concreto

adicionado con fibra de fique de 10 mm y, CF30: concreto adicionado con fibra de fique de 30mm.

Tabla 7. Dosificación de la mezcla de concreto para probetas cilíndricas y viguetas.

Constituyente	Probetas cilíndricas			Viguetas		
	Masa(Kg)) CS*	Masa (Kg) CF10*	Masa (Kg) CF30*	Masa(Kg)) CS*	Masa(Kg)) CF10*	Masa(Kg)) CF30*
Agua	8,05	8,05	8,05	5,70	5,70	5,70
Cemento	16,09	16,09	16,09	11,40	11,40	11,40
Ag. Grueso	37,48	37,48	37,48	26,54	26,54	26,54
Ag. Fino	30,61	30,45	30,45	21,68	21,57	21,57
Fique	--	0,15	0,15	--	0,11	0,11

*: CS: Concreto simple; CF10; Concreto adicionado con fibra de 10 mm, CF30; Concreto adicionado con fibra de 30 mm.

En la tabla 8 se presenta el diseño de experimentos empleado para esta investigación, en el que se tuvieron en cuenta los siguientes factores de entrada o fuentes de variación: edad con cuatro niveles, día tres, siete, catorce y veintiocho y longitud con tres niveles, cero, diez y treinta milímetros. Como variables de respuesta: resistencia a la compresión, tensión indirecta, flexión y VPU.

5.3.3 Actividad 3. Fabricación de las muestras de concreto: Con base en el diseño de mezcla se procedió a la elaboración de las probetas cilíndricas y las viguetas de concreto con adición y sin adición de fibra de fique, siguiendo lo establecido en la norma NTC 1377 ^[16].

Tabla 8. Fuentes de variación del diseño de experimentos.

FACTORES	NIVELES	VARIABLES DE RESPUESTA
Edad (días)	4	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión (MPa) • Resistencia a la tensión indirecta (MPa) • Resistencia a la flexión (MPa) • Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)
Longitud (mm)	3	

La figura 5 presenta los pasos seguidos durante la fabricación de las probetas cilíndricas con adición y sin adición de fibra de fique.

Durante la preparación de la mezcla de concreto simple se siguió el siguiente orden para agregar los materiales: agregado grueso, cemento, la mitad del agua, agregado fino y por último la otra mitad del agua. Y para la mezcla con adición de

fibra, se agregó la fibra después del agregado grueso, con un tiempo total de mezclado de cinco (5) minutos. Una vez lista la mezcla se llevó a cabo la prueba de asentamiento del concreto siguiendo la norma NTC 396 [21] y se procedió a la fabricación de las probetas, llenando los moldes con tres capas iguales de mezcla apisonando entre capas con una varilla metálica 25 veces para las probetas cilíndricas y 50 veces para las viguetas, además de ser golpeadas diametralmente en la pared exterior con un martillo de goma. Finalmente las probetas se desencofraron 24 horas después y se sumergieron en la pileta con agua, dando así la condición de 100% de humedad para el proceso de curado. La tabla 9 muestra la cantidad de probetas fabricadas teniendo en cuenta los días de curado, el contenido de fide y los ensayos realizados.

Figura 5. Procedimiento de fabricación de las probetas.



5.4 Etapa 4. EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO

Se evaluaron las muestras en los días 3, 7, 14 y 28 después de fabricadas, los ensayos realizados se exponen a continuación:

Tabla 9. Distribución empleada para la realización de las mezclas en concreto simple sin adición y adicionado.

DISTRIBUCIÓN DE PROBETAS A ENSAYAR				
Mezclas	Contenido de fique	L (mm)	Compresión y tensión indirecta	Flexión
1	NO	--	24	8
2	SI	10	24	8
3	SI	30	24	8
Total de probetas por ensayo			72	24
Total de probetas			96	

5.4.1 Actividad 1. Ensayo no destructivo VPU: Se realizó el ensayo de VPU a todas las muestras cilíndricas antes de ser ensayadas a tracción indirecta y compresión siguiendo la norma NTC 4325 ^[23], se ensayaron 6 probetas por cada uno de los días de curado planteados. El desarrollo de este ensayo se realizó teniendo las muestras en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS), se prepararon las superficies planas de las probetas (base y tapa) aplicando el material acoplante (vaselina) con el fin de que se tuviera contacto entre la superficie y el palpador. Seguidamente se ajustaron los parámetros necesarios en el equipo PUNDIT PLUS como se muestra en la tabla 10 y luego se realizó la calibración del mismo para proceder a ensayar las probetas mediante el método de transmisión directa, tomando dos medidas de tiempo de tránsito en tres puntos diferentes de la superficie de estas, los cuales se utilizaron junto con las medidas de longitud para obtener el valor de la VPU. En la figura 6 se observa el equipo PUNDIT PLUS y el montaje utilizado para el desarrollo del ensayo de VPU, el cual se llevó a cabo mediante el método de transmisión directa.

Tabla 10. Parámetro de trabajo para mediciones de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS	
Voltaje (v)	500
Unidades	Metros
Modo del pulso	Continuo
Modo de almacenamiento	----
Frecuencia de repetición del pulso (Hz)	10
Retardo del pulso (μ s)	30

Figura 6. Ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

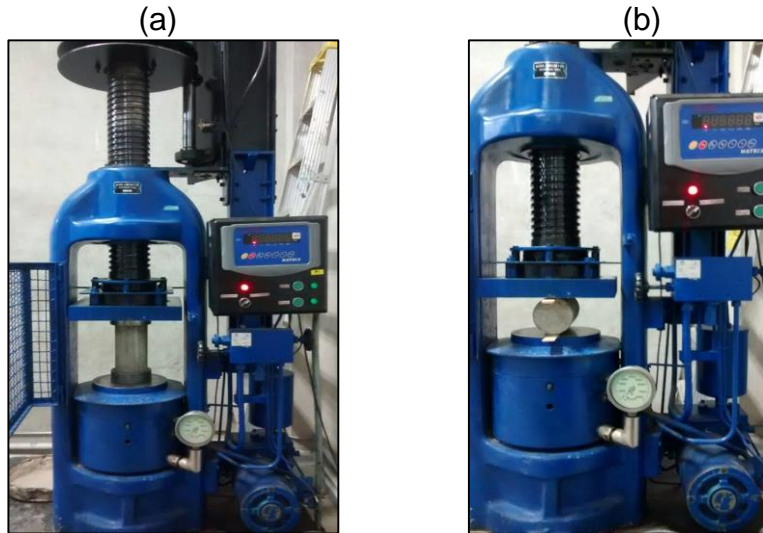


5.4.2 Actividad 2. Evaluación de propiedades mecánicas de las muestras:

Ensayo de resistencia a la compresión y resistencia a la tensión indirecta: Una vez realizado el ensayo de VPU a las probetas, se escogieron tres de estas para probar su resistencia a la compresión siguiendo la norma NTC 673 ^[24], este ensayo se llevó a cabo en la máquina universal de ensayos marca AMSLER de la Escuela de Ingeniería Civil. Para el desarrollo de esta prueba se colocó la probeta en la máquina asegurando la alineación de sus ejes con la placa de carga, la cual se bajó hasta tener contacto con el cilindro de concreto y así aplicar la carga con velocidad constante hasta llegar a la fractura de la probeta, obteniendo el valor de carga en dicho punto y observar el comportamiento de la probeta durante este proceso. En el ensayo de resistencia a la tensión indirecta se ensayaron las 3 probetas restantes siguiendo la norma NTC 722 ^[9], realizando los mismos pasos del ensayo anterior, pero cambiando la posición de la probeta en la máquina de ensayos. La figura 7 presenta el montaje de las probetas para el desarrollo de los respectivos ensayos.

Ensayo de flexión: Para este ensayo se utilizaron 2 viguetas de dimensiones 350x100x100 mm por día de ensayo, siguiendo la norma NTC 2871 ^[19] y utilizando la máquina universal de ensayos MTS (Material Test System), la cual cuenta con celda de carga de 25KN y actuador de 100KN de la Escuela de Ingeniería Civil, se marcaron sobre las caras laterales de las probetas los puntos de los apoyos (a una pulgada de cada extremo) y los puntos de la carga en los tercios medios de la misma. Después se colocó la probeta sobre una placa plana y firme, la cual estaba sujeta a la máquina de ensayos como se muestra en la figura 8, se ajustó el sistema de la misma y se aplicó carga hasta llegar al punto de fractura de la vigueta. Se utilizó velocidad de carga de 0,05 mm/s. En la figura 8 se presenta como fue el montaje de las probetas que fueron sometidas al ensayo de flexión.

Figura 7. Montaje probetas para ensayo de compresión y tracción indirecta.



(a) Ensayo de resistencia a la compresión. (b) Ensayo de resistencia a la tensión indirecta.

Figura 8. Montaje viguetas para ensayo de flexión.



5.5 ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En esta etapa se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos, en donde se encuentran tablas y gráficas donde se evidencia el comportamiento de las probetas para cada una de las propiedades estudiadas y su respectivo análisis.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación según lo planteado en la metodología experimental.

6.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

El proceso de fabricación se inició con la realización de la caracterización de la materia prima, en el anexo A se presenta la caracterización realizada para el agregado fino y al agregado grueso, mostrando sus principales propiedades físicas. Una vez caracterizada esta se realizó el diseño de mezcla según el ACI211.1 [11] mencionado anteriormente en la tabla 7.

La caracterización mecánica de la fibra de fique se realizó a 18 probetas bajo las normas ASTM D1577-07 [13] y ASTM D3822 [14] con el fin de determinar su resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, carga máxima, resiliencia y densidad lineal, para esta última se utiliza la ecuación (1). Los cálculos de la densidad lineal se adjuntan en el anexo A.

$$D_l = \frac{10000*W}{L*N} \quad (1)$$

D_l = Densidad lineal en [dtex]

W = masa del espécimen [mg]

L = Longitud del espécimen. [mm]

N = Número de fibras por espécimen.

En la tabla 11 se presenta la caracterización de las propiedades mecánicas de la fibra de fique, donde se tomaron los valores de las propiedades mecánicas que pertenecen al estudio completo realizado a 18 probetas de fibra.

Una inspección visual de la fibra permitió observar que los diámetros de la fibra eran variables por lo que se genera en la resistencia a la tracción una variabilidad de los resultados por lo que se obtuvo un rango de propiedades para la fibra con el fin de lograr caracterizar apropiadamente cada una de las propiedades estudiadas para las probetas diseñadas. Los cálculos de las propiedades mecánicas de la fibra y sus parámetros se presentan en el anexo A.

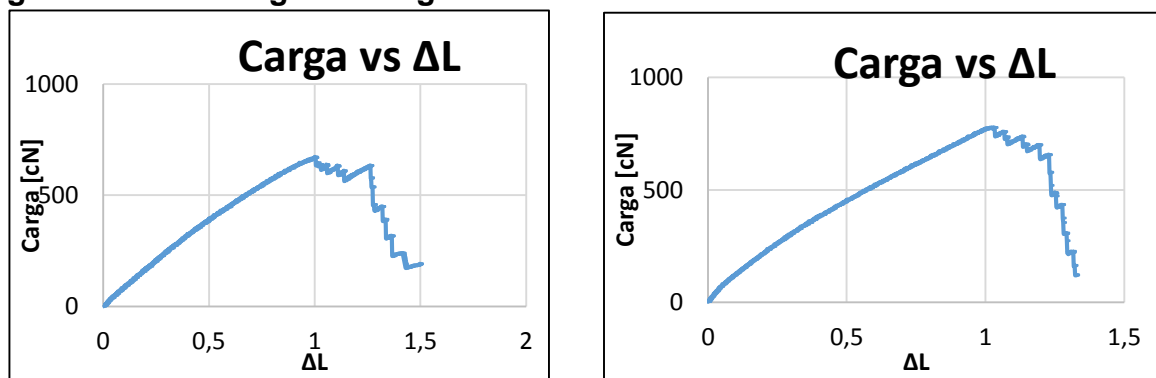
Los resultados de la caracterización mecánica realizada a 18 probetas de fique durante la investigación, están de acuerdo con los resultados obtenidos por Isaza Ruiz [4] debido a que se encuentran en el rango de valores presentados en su trabajo

de investigación, en la figura 9 se observan dos gráficas para la fibra, tomando en cuenta los valores máximos y mínimos de carga para calcular las respectivas propiedades.

Tabla 11. Caracterización de las propiedades mecánicas de la fibra de fique.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE FIQUE		
PROPIEDAD	Min	Max
MÓDULO ELASTICIDAD [cN/tex]	384,91	1040,82
CARGA MAX [cN]	266,25	825,00
ϵ CARGA MAX [mm]	4,83	11,31
% ϵ Carga MAX	3,22	7,54
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN [cN/tex]	12,49	38,70
DENSIDAD LINEAL (tex)	21,31	

Figura 9. Curva carga vs alargamiento.



En la figura 9 se observa que hay una variación de la pendiente de las dos probetas ensayadas tanto para la carga máxima de falla para las mismas, lo cual generó un rango de valores para cada propiedad mecánica calculada, debido a esto se procedió a utilizar un rango mínimo y máximo para la caracterización de las propiedades de la fibra, las gráficas presentan una caída de la curva después de llegar la carga máxima, lo cual se explica con la reacción en cadena de rotura de fibras de cada probeta.

6.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión indirecta, resistencia a la flexión y VPU.

6.2.1 Ensayo de resistencia a la compresión: La tabla 12 presenta los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión realizada a 3 cilindros por día de curado. Los resultados de este ensayo fueron expresados en unidades de esfuerzo (MPa), calculados con la ecuación (2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Dónde:

σ : Esfuerzo de fractura (MPa).

F : Fuerza de fractura (N).

A : Área de la sección transversal (mm^2).

Se tomaron en cuenta los resultados del concreto simple para cada día como el valor máximo del esfuerzo que podía alcanzar el concreto, de tal manera que para las mezclas adicionadas se calculó el porcentaje de esfuerzo alcanzado respecto a la resistencia del concreto no adicionado para cada día.

Tabla 12. Resistencia a la compresión para probetas cilíndricas.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)					
Día	CS	CF10		CF30	
	(MPa)	(MPa)	% Alcanzado	(MPa)	% Alcanzado
3	19,86	13,05	65,73	13,77	69,35
7	24,98	16,83	67,38	17,83	71,37
14	28,37	20,02	70,56	18,84	66,43
28	31,18	25,51	81,81	21,50	68,97

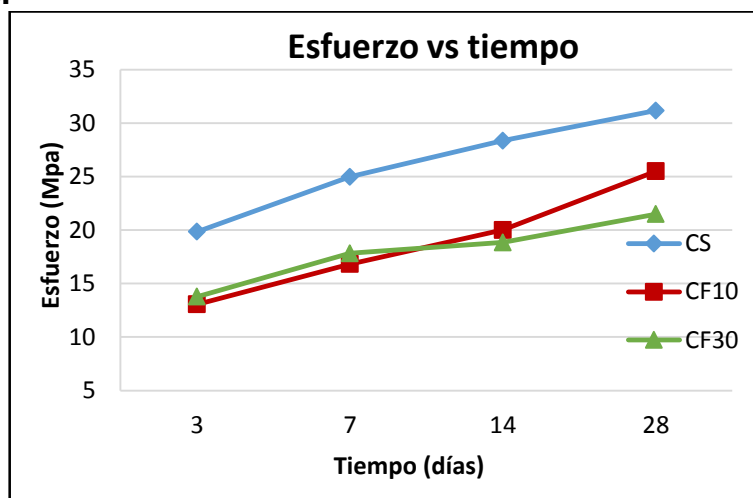
En la tabla 12 se muestra que la resistencia máxima a la compresión tuvo lugar en el día 28 de curado tanto para las probetas de concreto sin adición de fibra como para las probetas con adición de fibra de fique, además se observa que el concreto reforzado con fibra de 10 mm alcanza el 81,81% de la resistencia a la compresión del concreto simple, mostrando un comportamiento más cercano al concreto simple que el concreto con adición de fibra de 30 mm el cual obtuvo 68,97% de la resistencia a la compresión del concreto simple.

En la figura 10 se observa que a medida que transcurre el tiempo de curado la resistencia a la compresión aumenta para las tres mezclas donde el concreto sin adición presenta la mayor magnitud de la misma, además no se aprecia diferencia considerable entre la resistencia de los concretos adicionados con fibra de fique hasta el día 7. En el intervalo entre el día 7 al 28 el concreto adicionado con fibra de 10 mm superó la resistencia a la compresión del concreto adicionado con 30 mm;

los resultados obtenidos pueden atribuirse a las características heterogéneas de la mezcla teniendo en cuenta que la adición de fique de 10 mm presentó una mejor distribución debido a su longitud por lo cual la distribución de esfuerzos internos probablemente presentó mejor capacidad de absorber y redistribuir cargas, lo anterior concuerda con lo obtenido por Reyes Bañuelos ^[35] al presentar comportamientos similares en el ensayo de resistencia a la compresión con adición de fibras naturales.

El concreto adicionado con fibra de fique de 10 mm a pesar de llegar al 81,81 % de la resistencia a la compresión del concreto no adicionado, logró superar la magnitud de la resistencia del diseño de mezcla, debido que se planteó el diseño para una resistencia de 25MPa y la mezcla adicionada con 10 mm llegó en el día 28 a un valor de resistencia de 25,51 MPa.

Figura 10. Resistencia a la compresión para concreto simple y adicionado con fibra de fique.

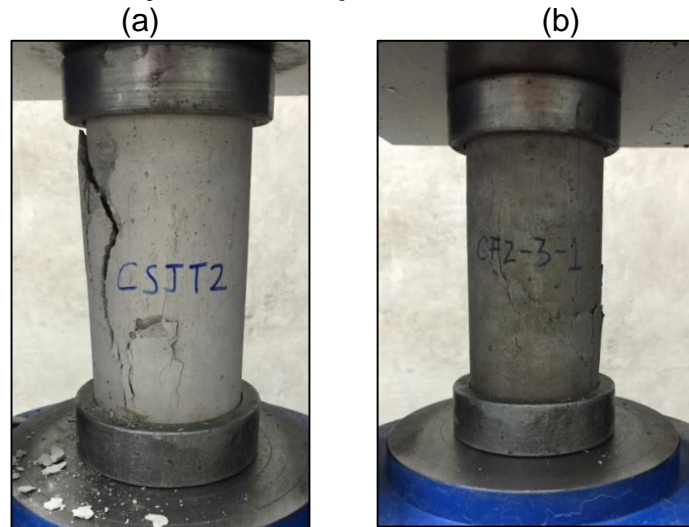


En la figura 11 se observa como fallaron las probetas sometidas a carga de compresión, para el caso de concreto simple el material presenta el comportamiento típico de un material frágil, se inició con la formación de grietas en uno de los extremos del cilindro, las cuales avanzaron rápidamente hasta generar su fractura total, además se evidenció desprendimiento de material. Las probetas con adición de fique de 10 y 30 mm presentaron agrietamiento lento desde los extremos de los cilindros con marcada adherencia de la fibra a la matriz inhibiendo la fracturación de la probeta y sin desprendimiento de material.

6.2.2 Ensayo de resistencia a la tensión indirecta: Se observa en la tabla 13 que el valor máximo para la resistencia a la tensión tiene lugar en el día 28 de la mezcla de concreto simple al presentar 3,08 MPa, seguido de la mezcla de concreto con adición de fique de 10 mm de longitud que presentó 2,49 MPa alcanzando el 80%

de la resistencia obtenida por el concreto no adicionado, además el concreto con adición de 30 mm logró el 74,81% de la resistencia a la tensión indirecta del mismo. Los resultados obtenidos concuerdan con el comportamiento obtenido por Reyes Bañuelos ^[31] y Quintero García ^[35] donde al haber adicionado una fibra natural detectó un comportamiento similar en los 28 días de curado para las probetas ensayadas a tensión indirecta.

Figura 11 .Probetas ensayadas a compresión



(a) Probeta de concreto simple. (b) Probeta de concreto adicionado con fibra de fique.

En la tabla 13 se presentan los resultados del ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta para probetas cilíndricas para los días de curado.

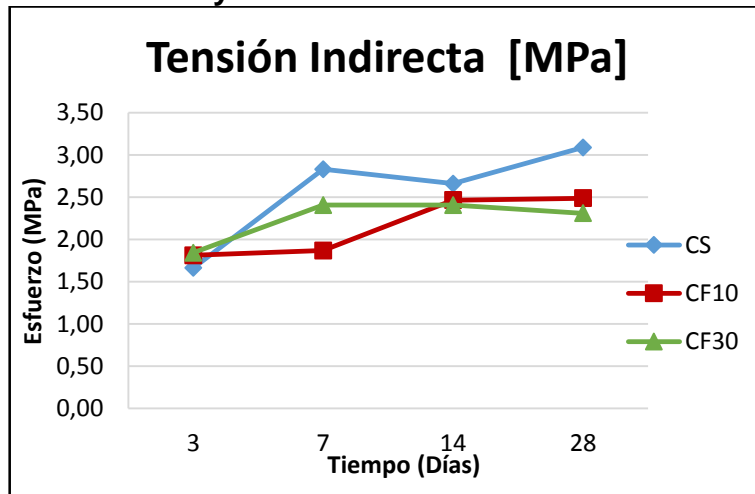
Tabla 13. Resistencia a la tensión indirecta para concreto sin adición y con adición.

RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA EN [MPa]					
Día	CS	CF10		CF30	
	[MPa]	[MPa]	% Alcanzado	[MPa]	% Alcanzado
3	1,66	1,81	109,06	1,84	110,82
7	2,83	1,87	66,01	2,41	84,96
14	2,66	2,47	92,73	2,41	90,50
28	3,09	2,49	80,60	2,31	74,81

Se observa en la figura 12 que las tres mezclas de concreto presentan un incremento en su resistencia a la tensión indirecta durante los 28 días de curado,

sin embargo el concreto con adición de fique de 10 mm presenta el mejor comportamiento respecto al incremento del esfuerzo de falla por lo cual probablemente sea la adición que ofrezca la mejor respuesta para la resistencia a la tensión indirecta.

Figura 12. Resistencia a la tensión indirecta del concreto simple y concreto adicionado con fibra de 10 y 30 mm.



La figura 13 presenta el resultado del ensayo a tracción indirecta sobre una probeta de concreto adicionado con fique, en la cual se observó que la fibra influenció la lenta deformación del material siendo este, un caso similar a lo ocurrido en el ensayo de resistencia a la compresión donde se hizo notable el agarre entre la fibra y la matriz de concreto controlando el desprendimiento de esta en conjunto, al oponer resistencia a la fractura se presentaron múltiples grietas a través de la probeta impidiendo que el concreto estallara repentinamente, contrario a lo sucedido con el concreto simple en el cual la probeta se agrieta y seguidamente se fractura, dividiéndose en dos partes (figura 13.a). El comportamiento para el concreto con adición genera amplias aplicaciones para este tipo de material ya que responde favorablemente en el control de la fractura.

Figura 13. Probetas ensayadas a tensión indirecta.



(a) Concreto simple. (b) Concreto adicionado con fibra.

6.2.3 Ensayo de resistencia a la flexión: En la tabla 14 muestra los resultados de la resistencia a la flexión basados en la NTC 2871 ^[32] para los días de curado. En esta tabla se observa que el concreto reforzado con fibra de fique de 10 mm en el día 28 soportó un esfuerzo máximo de 2,47 MPa alcanzado el 112,79% de la resistencia del concreto no adicionado, por lo anterior es posible afirmar que la adición de fibra causó un incremento en la resistencia a la flexión del material debido a la matriz generada por la fibra embebida en el concreto dando lugar a una distribución de esfuerzos internos e incrementando el módulo de rotura del mismo, lo cual concuerda con el trabajo realizado por Quintero García ^[35] quien al adicionar fibras naturales obtuvo resultados similares respecto al incremento de la resistencia a la flexión, deformación y la tenacidad al día 28 para probetas adicionadas.

La tabla 14 muestra los resultados de los cálculos del módulo de rotura, % alcanzado respecto al concreto simple y la deformación para viguetas rectangulares. En esta tabla *R: Módulo de rotura.

Tabla 14. Módulo de rotura y deformación para viguetas.

MÓDULO DE ROTURA Y DEFORMACIÓN.							
Días	CS	CF10			CF30		
	R (MPa)	R (MPa)	% Alcanzado	ε (mm)	R (MPa)	% Alcanzado	ε (mm)
3	1,79	1,69	94,29	2,120	1,86	103,96	1,103
7	2,25	2,10	93,17	0,862	2,13	94,53	0,844
14	2,23	2,39	107,17	1,052	2,71	121,55	1,335
28	2,19	2,47	112,79	1,203	2,44	111,15	1,171

En la figura 14 se evidenció que el módulo de rotura incrementa para las tres mezclas pero las adicionadas superan al concreto simple en su módulo de rotura al día 28 días de curado. Cabe resaltar que la mezcla con 10 mm de fibra presenta un comportamiento creciente de su módulo a los 28 días de curado por lo cual la adición de fibra genera un incremento en la resistencia a la flexión del concreto, por lo tanto probablemente la adición de la fibra proporcione propiedades apropiadas para el diseño de un concreto que requiera buen desempeño respecto a la flexión.

En las figuras 15 y 16 se muestra como fue la fractura de las viguetas con y sin adición de fibra de fique respectivamente. Las probetas presentaron un buen desempeño respecto a lo establecido por el diseño, la mayoría de estas rompiendo en el área de los tercios medios. Para el concreto con adición se observó buena adherencia del fique a la matriz de este, la cual como en los ensayos anteriores no fue suficientemente resistente como para evitar su fractura pero controló el desprendimiento de material y presentó un aumento en la resistencia a la flexión comparada con el concreto simple.

Figura 14. Resistencia a la flexión de viguetas adicionadas y no adicionadas.

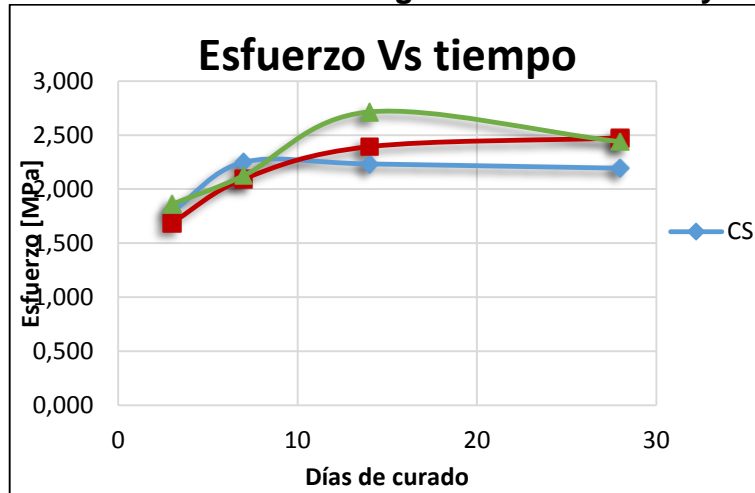


Figura 15. Probeta de concreto adicionado con fibra de fique ensayada a flexión.

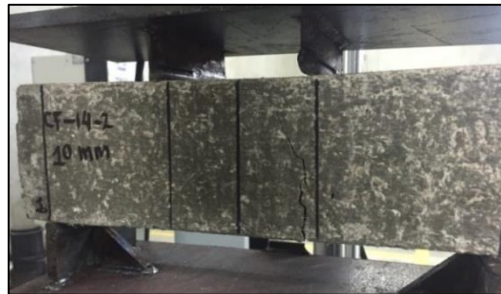


Figura 16. Probeta de concreto simple ensayada a flexión.



6.2.4 Ensayo de Velocidad de pulso ultrasónico: En la figura 16 se observa que la VPU incrementa para las tres mezclas a medida que pasan los días de curado. La magnitud de la VPU difiere para cada mezcla por lo cual se afirma que la velocidad de pulso detecta el cambio en la matriz del concreto, en este caso debido a la adición de fibra de fique.

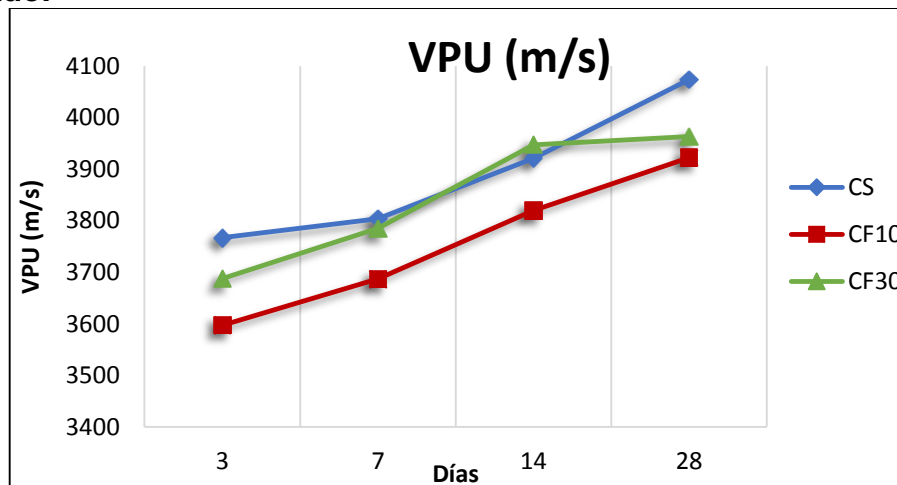
En la tabla 15 se aprecia que la VPU es capaz de detectar el cambio en la heterogeneidad del material debido a la fibra, sin embargo entre 10 y 30 m de fibra la VPU no tuvo variación significativa debido a que fue cercana al 0,2% entre una y otra, incluso la velocidad de pulso para las mezclas adicionadas es superior al 95% de la mezcla sin adición por lo cual no hay una diferencia relevante para argumentar que las mezclas adicionadas se comportaron distinto en su VPU por la distribución interna de la fibra. Lo mencionado anteriormente comprueba que la VPU detecta los cambios en las propiedades mecánicas del material, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Ariza Díaz ^[1] al encontrar que al realizar el cálculo de VPU se puede realizar una caracterización del concreto como material compuesto.

Tabla 15. Velocidad de pulso ultrasónico para concreto adicionado y no adicionado.

VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO [m/s]			
Tipo	CS	CF10	CF30
	[m/s]	[m/s]	[m/s]
3	3766,84	3597,04	3687,64
7	3803,84	3686,82	3784,94
14	3921,28	3819,55	3947,17
28	4073,92	3922,37	3963,44

En la figura 17 y la tabla 15 se observa que la velocidad de pulso ultrasónico incrementa para las tres mezclas a medida que pasan los días de curado. La magnitud de la VPU es diferente para cada mezcla por lo cual se puede afirmar que la velocidad de pulso detecta la presencia de fibra en las probetas ensayadas para cada mezcla respectivamente.

Figura 17. Velocidad de pulso ultrasónico para concreto adicionado y no adicionado.



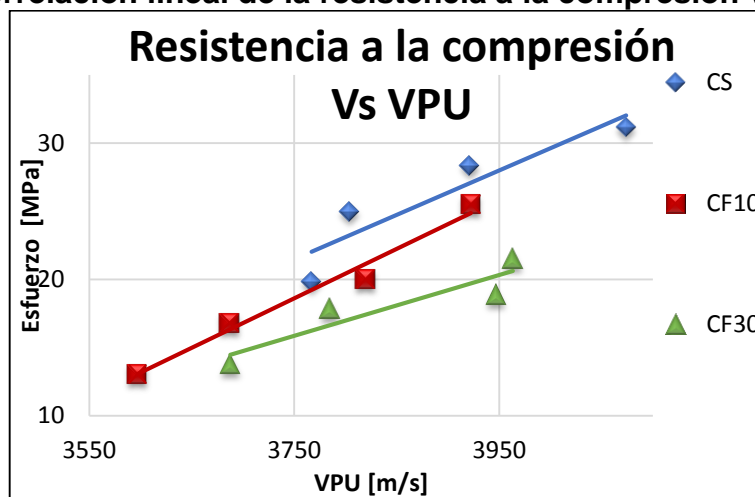
6.3 Correlación entre VPU y el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de fique: La tabla 16 muestra la resistencia a la compresión y VPU para cada día de curado en las 3 mezclas.

Tabla 16. Relación de la resistencia a la compresión y VPU durante los 28 días de curado.

Día	Resistencia a la compresión vs VPU					
	CS		CF10		CF30	
	(MPa)	VPU (m/s)	(MPa)	VPU (m/s)	(MPa)	VPU (m/s)
3	19,86	3767	13,05	3597	13,77	3688
7	24,98	3804	16,83	3687	17,83	3785
14	28,37	3921	20,02	3820	18,84	3947
28	31,18	4074	25,51	3922	21,50	3963

En la figura 18 y tabla 16 es posible evidenciar que la VPU tiene una relación directamente proporcional con el aumento de la resistencia a la compresión para las tres mezclas y además en la tabla 18 se presentan las ecuaciones obtenidas al ajustar la gráfica de cada mezcla a un modelo matemático lineal realizado por el método de mínimos cuadrados que junto al coeficiente de correlación permiten apreciar que las ecuaciones obtenidas de la relación entre VPU y resistencia a la compresión presentan un alto coeficiente de correlación entre el ensayo no destructivo y su resistencia a la compresión, de tal manera que la mejor relación para resistencia y la VPU ocurre para el concreto con adición de 10 mm, sin embargo las dos mezclas restantes también tienen alto grado de correlación.

Figura 18. Correlación lineal de la resistencia a la compresión vs VPU.



La tabla 17 muestra correlación lineal entre la resistencia a la compresión y VPU para cada día de curado en las 3 mezclas.

Tabla 17. Correlación lineal de propiedades mecánicas vs VPU.

CORRELACIÓN LINEAL ENTRE ENSAYOS MECÁNICOS Y LA VPU		
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
MEZCLA	ECUACIÓN	R²
CS	$y = 0,0326x - 100,74$	0,93
CF10	$y = 0,0363x - 117,55$	0,99
CF30	$y = 0,0223x - 67,708$	0,92
RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA		
CS	$y = 0,032x - 10,14$	0,72
CF10	$y = 0,00241x - 6,9278$	0,94
CF30	$y = 0,001475x - 3,433$	0,73
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN		
CS	$y = 0,0008x - 1,048$	0,51
CF10	$y = 0,00237x - 7,785$	0,96
CF30	$y = 0,002619x - 7,785$	0,94

En la figura 19 se aprecia la correlación lineal entre la resistencia a la tensión indirecta y la VPU para cada mezcla de concreto durante los 28 días de curado, en esta es posible apreciar que la VPU incrementa a medida que aumenta la resistencia a la tensión indirecta por lo cual hay una correlación lineal entre las mencionadas, sin embargo los resultados presentados en la tabla 18 solo fueron concluyentes para la mezcla con adición de fique de 10 mm que presentó un valor alto en el coeficiente de correlación lineal de 0,94, de tal manera que es posible predecir la resistencia a la tensión indirecta a partir del ensayo no destructivo para esta mezcla.

La figura 20 permite observar que a medida que incrementa el módulo de rotura, así mismo incrementa la VPU por lo cual hay una relación directamente proporcional entre ellos, además con los resultados de la tabla 17 se afirma que probablemente la correlación lineal para los concretos adicionados tiene un alto coeficiente de correlación; 0,96 y 0,94 para concretos con fibra de 10 y 30 mm respectivamente, donde se destaca el concreto con adición de fibra de fique 10 mm que presenta el mayor coeficiente de correlación para estimar el módulo de rotura de la mezcla adicionada con fique.

Figura 19. Resistencia a la tensión indirecta vs VPU.

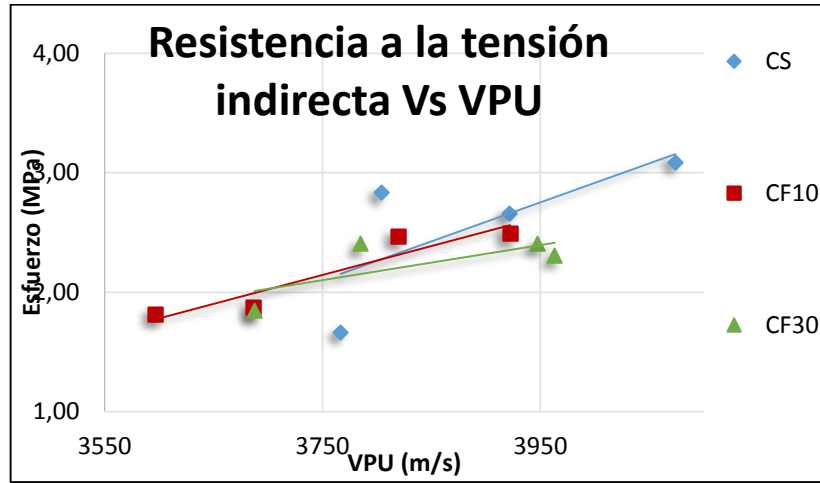
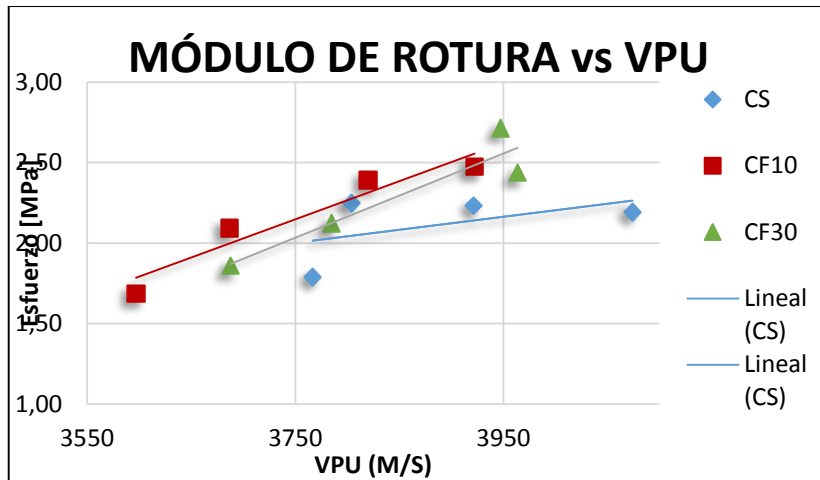


Figura 20. Resistencia a la flexión vs VPU.



7. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se concluye que:

La densidad de la fibra de fique tiene un valor de 21,31 (tex) lo cual corresponde a valores de resistencia a la tracción donde se halló la resistencia mínima de 12,49 (cN/tex) y máxima de 38,70 (cN/tex), así mismo se halló la deformación mínima de 3,22% y máxima de 7,54% debido a que la fibra presentaba diámetros variables por lo que sus propiedades mecánicas a establecer mediante un rango mínimo y máximo tal cual como se realizó.

La fibra de fique presenta propiedades mecánicas apropiadas para ser utilizada como adición para el diseño de mezcla de concreto. La fibra como adición aumenta la absorción de energía y deformación del concreto tras someterse al ensayo de flexión, es decir; ayuda a incrementar la magnitud del módulo de rotura. Además la fibra actúa como una red que reduce la tendencia del concreto a fracturar violentamente al llegar al esfuerzo de falla en compresión, tensión indirecta y flexión.

La resistencia a la compresión del concreto con adición de fique obtuvo 81,81% de la resistencia alcanzada por el concreto no adicionado. Por otro lado el concreto adicionado con fibra de fique de 10 mm, a pesar de no alcanzar el 100% de la resistencia del no adicionado alcanzó una resistencia de 25,51 MPa cumpliendo con el esfuerzo de falla para el diseño de mezcla planteado.

El concreto adicionado con fibra de fique con adición de 10 y 30 mm superó el módulo de rotura de la resistencia a la flexión del concreto no adicionado en un 112,79% y 111,15%, de tal manera que es posible afirmar que la adición de fibra confirió al concreto un aumento en su resistencia a la flexión mayor al 10% y así mismo su deformación incrementó, lo anterior atribuido posiblemente a la matriz formada por el concreto y la fibra embebida en el mismo, generando una distribución de esfuerzos más uniforme.

La VPU detectó el cambio en la heterogeneidad del material debido a que se presentó una variación en el tiempo de tránsito del pulso tras la adición de fibra, variando su velocidad de pulso, la VPU disminuyó respecto al concreto simple en un 5% aproximadamente y entre concretos adicionados solo se presentó una variación cercana al 0,2%.

Al evaluar las propiedades mecánicas de la adición de fibra en las dos longitudes estudiadas, 10 y 30 mm; se determinó que el concreto con adición de fibra de fique de 10 mm presentó el mejor comportamiento mecánico. Las propiedades mecánicas de compresión y tensión indirecta del concreto adicionado no superaron en magnitud al concreto simple pero llegaron al esfuerzo del diseño de mezcla; la

resistencia a la flexión de las dos longitudes adicionadas superó al concreto simple al final de los 28 días de curado, además se confirma que la adición de fibra de 10 mm fue la de mejores resultados haciendo la correlación lineal con la VPU debido a que presentó los coeficientes de correlación más altos para todos los ensayos.

8. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos durante esta investigación se recomienda:

Continuar con el estudio del comportamiento mecánico influenciado por la adición de la fibra de fique en el concreto, teniendo en cuenta diferentes longitudes, porcentaje de adición de la fibra y relación agua/cemento con el fin de obtener resultados más precisos y de esta manera determinar los valores ideales para obtener una mezcla que cumpla satisfactoriamente con requerimientos de resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión.

Realizar el ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico con los métodos semidirecto e indirecto, para complementar y relacionar los resultados obtenidos con el método directo y de este modo obtener valores más precisos.

Investigar acerca de la durabilidad de concretos adicionados con fibras cuando están expuestos a diversas condiciones en ambiente natural y correlacionar estos resultados con los valores obtenidos en los ensayos mecánicos realizados.

CITAS

[1] ARIZA DÍAZ, Diana Marcela (2010), Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado sobre la velocidad de pulso ultrasónico en concreto sin refuerzo. Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.

[2] Guía ambiental del subsector figuero. 2ª ed. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial y Cadena Productiva Nacional del Fique. Bogotá D.C., 122 pp

[3] HERRERA, Julián; CRUZ, Ricardo; ZAPATA, Luis. INFLUENCIA DE LAS FIBRAS NATURALES SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

[4] ISAZA RUIZ, Marlolly (2015). Caracterización mecánica y morfológica de fibras de fique con potencial uso acústico. Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Medellín, Colombia.

[5] JIMÉNEZ BOHÓRQUEZ, Jonny (2011). Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (fibra de fique). Universidad La Gran Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

[6] JUÁREZ ALVARADO, Cesar (2002). Concretos base cemento portland reforzados con fibras naturales (agave lechuguilla), como materiales para construcción en México. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

[7] MAHECHA VEGA, Gilberto Emilio. Vegetación del territorio CAR: 450 especies de sus llanuras y montañas, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2004.

[8] Materiales compuestos, Ciencia de los Materiales, 4º curso. [En línea], 2004. Disponible en internet: http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema7_CM.pdf

[9] MOJICA PIMIENTO, Amílcar. El cultivo del fique en Santander [En línea] 2015. Centro Regional de Estudios Económicos Bucaramanga. Disponible en internet: <http://www.banrep.gov.co/es/eser-13>

[10] MUÑOZ CEBRIÁN, Fernando (2011). Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado.

[11] NORMA ACI 211.1: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05).

[12] NORMA ASTM C873: Test method for compressive strength of concrete cylinders cast in place in cylindrical molds.

[13] NORMA ASTM D1577-07: Standard test methods for linear density of textile Fibers.

[14] NORMA ASTM D3822: Standard test method for tensile properties of single textile fibers.

[15] Norma NTC 121: Especificación de desempeño para cemento hidráulico.

[16] NORMA NTC 1377: Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio.

[17] NORMA NTC 176: Método para determinar la densidad y absorción del agregado grueso.

[18] NORMA NTC 237: Método para determinar la densidad y absorción de agregados

[19] NORMA NTC 2871: Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios).

[20] NORMA NTC 321: Cemento Portland. Especificaciones químicas.

[21] NORMA NTC 396: Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto fresco.

[22] NORMA NTC 3459: Agua para la elaboración de concretos.

[23] Norma NTC 4325: Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto.

[24] NORMA NTC 673: Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

[25] NORMA NTC 722: Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto.

[26] NORMA NTC 92: Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado.

- [27] LOZANO RIVAS, William Antonio (2012). Uso del extracto de fique (*furcraea* sp.) como coadyuvante de coagulación en tratamiento de lixiviados Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- [28] OTTAZZI PASINO, Gianfranco (2004). Material de apoyo para la enseñanza de los curso de diseño y comportamiento del concreto armado. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- [29] PARRA LOPÉZ, Guillermo & PARRA MEJÍA, Marco (2007). Comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra. Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.
- [30] PINZÓN GALVIS (2013), Sandra. Análisis de la resistencia a compresión y flexión modificado con fibra de fique. Universidad Piloto de Colombia, Magdalena, Colombia.
- [31] REYES BAÑUELOS, Uriel Isaac (2008), concreto reforzado con fibra de bagazo de caña Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería civil, Veracruz, México.
- [32] ROMA, Luiz; MARTELLO, Luciane& SAVASTANO, Holmer (2008). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetables fibers. Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil.
- [33] Tecnología de los materiales, Blog dedicado a los materiales compuestos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado. Disponible en internet: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>
- [34] TOLEDO, Romildo; SILVA, Flávio; FAIRBAIRN, E.M.R. & MELO, Joao; (2009). Durability of compresion molded sisal fiber reinforced mortar laminates. Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil.
- [35] QUINTERO GARCIA, Sandra Liliana (2006), Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Universidad del Norte.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. Standard test methods for linear density of textile Fibers. ASTM D1577-07. Conshohocken, Pensilvania : ASTM, 2007

----- Standard test method for tensile properties of single textile fibers. Conshohocken, Pensilvania. ASTM 2007.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto. NTC 4325. Bogotá: ICONTEC, 1997

JIMÉNEZ BOHÓRQUEZ, Jonny. Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (fibra de fique). Tesis de grado Ingeniero Civil. Bogotá: Universidad La Gran Colombia, 2011.

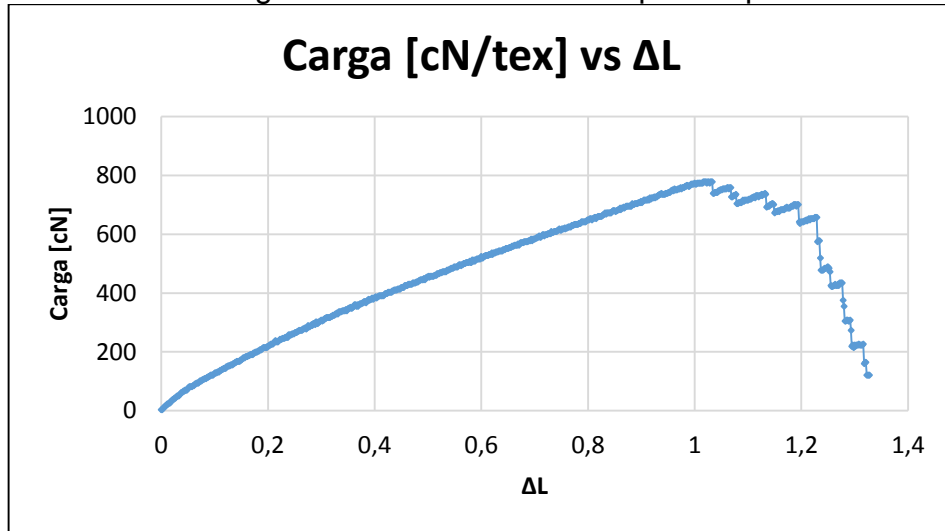
PINZÓN GALVIS, Sandra. Análisis de la resistencia a compresión y flexión modificado con fibra de fique. Universidad Piloto de Colombia, Magdalena, Colombia. *Ingenierías*. [en línea] 2013. Octubre-Diciembre. Vol 16 N° 61. P. 27-37. [consultado 3 abril 2016] Disponible en: file:///C:/Users/BiblioUis/Downloads/61_analisis.pdf

ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE

En la figura se observa la curva esfuerzo deformación unitaria para la probeta F12.

Curva de la carga vs deformación unitaria para la probeta F12.



Cálculos para hallar la densidad lineal basada en la norma ASTM D1577-07

$$D_l = \frac{10000 * W}{L * N}$$

D_l = Densidad lineal en (dtex)

W = masa del espécimen (mg)

L = Longitud del espécimen. (mm)

N = Número de fibras por espécimen.

Para el cálculo de la densidad lineal se realizaron 4 corridas donde en cada una se pesó la masa de 11 probetas con longitud desde 50 mm hasta 150 mm aumentando la longitud en 10 mm por prueba tal como se muestra en la tabla de corridas realizadas, posterior a esto se calculó un promedio para la masa de las probetas por cada longitud.

Se procedió a realizar una estimación de la densidad mediante el cálculo de la pendiente de la gráfica por el método de mínimos cuadrados como se muestra en las tablas de longitud vs masa promedio y la tabla de correlación lineal por mínimos cuadrados, la pendiente calculada fue 0,4263 que corresponde al valor de W/L de la norma ASTM D1577-07, posteriormente se multiplicó por diez mil (10.000) y se dividió por el número de fibras, seguido a esto se multiplicó por 0.1 debido a que el

resultado arrojaba la densidad en decitex (dtex) y se buscaba obtener un resultado en tex (tex) tal como se muestra a continuación.

CORRIDAS PARA CALCULAR LA DENSIDAD DEL FIQUE											
Probeta	Longitud [m]	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3		Corrida 4		Masa prom [g]	Masa prom [mg]
		m1 [g]	m1 [mg]	m2 [g]	m2 [mg]	m3 [g]	m3 [mg]	m4 [g]	m4 [mg]		
1	0,05	0,02	24,70	0,03	26,40	0,02	23,70	0,02	22,90	0,02	24,43
2	0,06	0,03	32,90	0,03	31,80	0,03	31,20	0,03	28,60	0,03	31,13
3	0,07	0,04	36,50	0,03	31,70	0,03	33,80	0,03	30,10	0,03	33,03
4	0,08	0,04	36,20	0,03	30,30	0,02	24,90	0,04	38,90	0,03	32,58
5	0,09	0,04	37,90	0,04	38,80	0,04	39,20	0,05	46,10	0,04	40,50
6	0,10	0,04	43,30	0,03	28,70	0,05	49,90	0,05	49,80	0,04	42,93
7	0,11	0,05	48,30	0,05	47,80	0,05	52,20	0,05	45,00	0,05	48,33
8	0,12	0,05	46,30	0,06	55,80	0,06	60,80	0,05	50,20	0,05	53,28
9	0,13	0,05	54,10	0,04	37,00	0,07	66,00	0,04	44,20	0,05	50,33
10	0,14	0,05	50,10	0,07	72,50	0,08	80,30	0,05	52,70	0,06	63,90
11	0,15	0,07	65,80	0,07	65,40	0,08	84,70	0,07	71,20	0,07	71,78

LONGITUD VS MASA	
MEDIDA (mm)	MASA PROM (mg)
50	24,4250
60	31,1250
70	33,0250
80	32,5750
90	40,5000
100	42,9250
110	48,3250
120	53,2750
130	50,3250
140	63,9000
150	71,7750

CORRELACIÓN LINEAL	
DENSIDAD	21,31704545
CC*	0,971272825

*CC: Coeficiente de correlación.

$$D_t = \frac{10000 * 0,4263}{20} * 0,1 = 21,31 \text{ (tex)}$$

Cálculos para hallar la resistencia a la tracción basada en la norma ASTM D3822:

$$\gamma = \frac{F}{D_l}$$

γ = Resistencia a la tracción [cN/tex].

F = Fuerza de rotura [cN]

D_l = densidad lineal [tex]

A continuación se presentan los cálculos la resistencia a la tensión para la probeta F12.

$$\gamma = \frac{825 \text{ cN}}{21,31 \text{ tex}} = 38,71 \frac{\text{cN}}{\text{tex}}$$

Cálculo del ΔL para probeta F12:

$$\Delta L = L_f - L_i$$

Para el cálculo del módulo de elasticidad:

El módulo de elasticidad se realiza calculando la pendiente entre la deformación unitaria (ϵ_u) y la fuerza en (cN/tex) hasta llegar a la carga máxima con los valores obtenidos por la máquina de ensayos para cada probeta.

ANEXO B. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, A LA TRACCIÓN INDIRECTA Y VPU.

Dimensiones de las probetas cilíndricas:

Radio de la probeta: $r = 50.8$ mm; Longitud: $L = 203.2$ mm y Diámetro: $D = 101.6$ mm.

Los valores de la carga P son proporcionados por la máquina universal de ensayos, los cuales se muestran en las siguientes tablas para el concreto con y sin adición de fique.

Resistencia a la compresión: $\sigma = \frac{P}{\pi r^2}$

Dónde:

σ = esfuerzo (MPa)

P = carga máxima (N)

r = radio de la probeta (mm)

Ej; Día 3, probeta CS-3,9: $\sigma = \left(\frac{170.5\text{KN}}{\pi(50.8\text{mm})^2} \right) * \left(\frac{1000\text{N}}{1\text{KN}} \right) = 21.0303 \text{ MPa}$

Resistencia a la tracción indirecta: $\sigma = \frac{2P}{\pi DL}$

Dónde:

σ = esfuerzo (MPa)

P = carga máxima (N)

D = diámetro de la probeta (mm)

L = Longitud de la probeta (mm)

Ej; Día 3, probeta CS-3,7:

$$\sigma = \left(\frac{2*63,3\text{KN}}{\pi*101.6\text{mm}*203.2\text{mm}} \right) * \left(\frac{1000\text{N}}{1\text{KN}} \right) = 0.0019519 \text{ MPa}$$

Velocidad de Pulso Ultrasónico: $VPU = \frac{D}{t}$

Dónde:

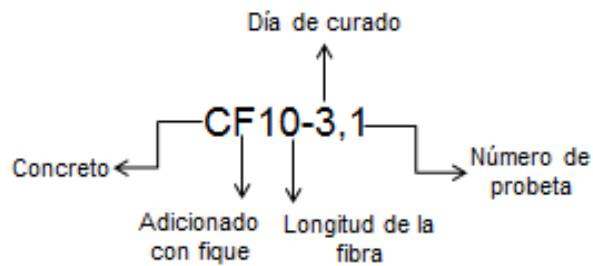
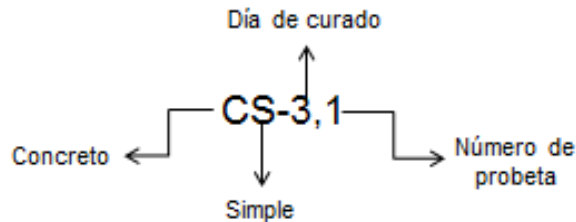
VPU = Velocidad de Pulso Ultrasónico (m/s)

D = distancia promedio entre los palpadores (mm)

t = tiempo de tránsito del pulso (s)

Ej; Día 3, probeta CS-3,9: $VPU = \left(\frac{0,2098 \text{ m}}{54,31667 \mu\text{s}} \right) * \left(\frac{1000000 \mu\text{s}}{1 \text{ s}} \right) = 3863.30 \text{ m/s}$

La nomenclatura que se utilizó en las probetas fue la siguiente:



CONCRETO SIMPLE (CS)

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN N		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CS-3,7	20.8 7	20.8 6	20.8	20.843333 3	52.9	53.7	53.9 5	53.516666 7		0	63.3	1.84653547 4	3921.05349 7
CS-3,9	20.8 9	20.8 8	20.8 9	20.886666 7	54.1 5	55.0 5	53.7 5	54.316666 7	170. 5	20.070 9		0	3863.30247 9
CS-3,6	21.2	21	21.7	21.3	56.7	58.2 5	58	57.65		0	49	1.42938765	3639.92563 7
CS-3,10	20.9 4	20.9 8	20.9 7	20.963333 3	54.1	55	55.6	54.9	176. 9	20.824 3		0	3822.25342 4
CS-3,4	21.4 8	21.4	21.6	21.493333 3	55.6 5	56.8 5	55.0 5	55.85		0	58.7	1.71234806 2	3757.23747 5
CS-3,12	20.8 1	20.9 8	20.9 9	20.926666 7	57.5 5	59.2 5	58.2	58.333333 3	158. 6	18.670 1		0	3597.28650 8

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN N		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CS-7,10	20.9 7	21.0 3	21.0 2	21.006666 7	56.1	55.5	56.3 5	55.983333 3	212. 7	25.038 6		0	3748.28900 8
CS-7,9	20.9 8	20.9 3	20.9 2	20.943333 3	54.5 5	55.1 5	54.9 5	54.883333 3		0	100. 4	2.92878612 3	3823.41414 4
CS-7,2	20.3 7	20.6 2	20.4	20.463333 3	53.4 5	53.1	54	53.516666 7		0	87.3	2.54664371	3921.05349 7
CS-7,12	21.0 5	20.9 8	21.2 4	21.09	56.4 5	55.4	55.7	55.85	215. 8	25.403 5		0	3757.23747 5

CS-7,1	21.0 6	21.0 1	21.2	21.09	56.1	54.3 5	53.9 5	54.8		0	103. 6	3.02213388 8	3829.22833 9
CS-7,4	20.9 1	21	20.9 6	20.956666 7	56	55.7	56.4 5	56.05	208	24.485 3		0	3743.83074

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [□seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓ N		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CS-14,3	20.9 1	20.9 2	20.9	20.91	51.4 5	51.8	51.7 5	51.666666 7	236. 8	27.875 6		0	4061.45250 9
CS-14,1	21	20.9 5	21	20.983333 3	54.3	53.5 5	53.1	53.65	248	29.194		0	3911.30872 3
CS-14,4	21.0 4	20.9 4	21.0 4	21.006666 7	54.3	54.3	53.9 5	54.183333 3	238. 1	28.028 6		0	3872.80922 1
CS-14,2	20.8 2	20.8 1	20.9 4	20.856666 7	52.9	53.2 5	52.6	52.916666 7		0	95.8	2.79459871 1	3965.51268 6
CS-14,5	21.0 4	21.0 6	21.0 5	21.05	54.9	55.5	55.3	55.233333 3		0	96.3	2.80918429 9	3799.18611 3
CS-14,6	21.0 5	21.0 7	21.0 3	21.05	54.5 5	53.9	52.2 5	53.566666 7		0	81.5	2.37745088 7	3917.39352 1

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [□seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓ N		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CS-28,11	20.9 5	20.9 7	20.9 9	20.97	50.9 5	51.1	50.9 5	51	266. 8	31.407 1		0	4114.54339 1
CS-28,5	20.9 7	20.9 9	20.9 6	20.973333 3	51	50.9 5	51.3 5	51.1	264. 8	31.171 7		0	4106.49144 7
CS-28,12	20.9 4	20.9 2	20.9 1	20.923333 3	51.2	50.7	51.9	51.266666 7	262. 9	30.948		0	4093.14134 5

CS-28,8	21.1 1	21.1 2	21.1 2	21.116666 7	52.7 5	51.3 5	51.2	51.766666 7		0	116. 1	3.38677359 4	4053.60681 8
CS-28,9	20.8 9	20.8 9	20.8 8	20.886666 7	50.6 5	50.7	50.8	50.716666 7		0	98	2.85877529 9	4137.52966 7
CS-28,10	21	20.9 8	20.9 8	20.986666 7	53	53.3 5	53.5	53.283333 3		0	103. 5	3.01921677	3938.22420 3

CONCRETO CON FIBRA DE FIQUE DE 10 mm (CF10)

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distanci a promedi o	TIEMPO [□seg]			Tiempo promedi o	COMPRESIÓ N		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CF-3,8	21.2 2	21.2 2	21.2 3	21.223	58.3	58.1 5	58.3	58.25		0	66.3	1.93404900 3	3602.432841
CF-3,1	20.9 1	20.9 8	20.9 0	20.930	59.6	60.5	60.1 5	60.1	101.9	11.995		0	3491.542645
CF-3,9	20.9 3	20.9 4	20.9 3	20.933	59	59	59.2	59.067		0	58.8	1.71526518	3552.624937
CF-3,2	21.0 6	21.0 2	20.9 8	21.02	58.1 5	56.8	58.0 5	57.667	113.4	13.349		0	3638.873635
CF-3,5	20.8 7	20.8 8	20.9 1	20.887	57.4 5	57.7 5	57.5 5	57.583		0	61.4	1.79111023 9	3644.139733
CF-3,6	20.9	20.9	20.9 3	20.910	56.9 5	57.7	57.7	57.45	117.3	13.808			3652.597267

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [□seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓ N		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CF-7,6	20.8 6	20.8 4	20.8 6	20.853333 3	56.3	56.8	56.3	56.466666 7		0	56	1.63358588 5	3716.20507

CF-7,5	21	20.9 8	20.9 7	20.983333 3	57.3	57.1	57.8 5	57.416666 7	144. 3	16.986 7		0	3654.71778 7
CF-7,3	20.9 4	20.9 5	20.9 5	20.946666 7	57.3 5	57.3 5	57.5 5	57.416666 7		0	66.4	1.93696612 1	3654.71778 7
CF-7,4	20.9 1	20.9 2	20.9	20.91	56.5 5	56.7	56.3 5	56.533333 3	154. 8	18.222 7		0	3711.82275 3
CF-7,1	20.8 3	20.8 5	20.8 3	20.836666 7	57.1	56.2	56.6	56.633333 3	129. 8	15.279 8		0	3705.26862 2
CF-7,2	20.8 7	20.8 8	20.8 9	20.88	57.2	56.5 5	57.4	57.05		0	69.9	2.03906523 9	3678.20706 3

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [□seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CF-14,1	21	20.9 9	20.9 8	20.99	54.6 5	54.7 5	54.1 5	54.516666 7	163. 6	19.258 6		0	3849.12955 6
CF-14,2	20.9 4	20.9	20.9 4	20.926666 7	54.1 5	54.8	54.7	54.55	175	20.600 6		0	3846.77750 6
CF-14,6	21.0 1	21.0 6	21.0 6	21.043333 3	54.5	54.9 5	55.3	54.916666 7		0	84.2	2.45621306 3	3821.09340 8
CF-14,4	21.0 1	21	21	21.003333 3	54.2 5	54.8 5	54.4 5	54.516666 7		0	83.5	2.43579324	3849.12955 6
CF-14,5	21.0 3	21.0 4	21.0 2	21.03	54.6 5	55.2	55.3 5	55.066666 7	171. 5	20.188 6		0	3810.68486
CF-14,3	21	20.9 8	21.0 3	21.003333 3	56.4 5	56.6	55.2 5	56.1		0	86	2.50872118 1	3740.49399 2

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [□seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	

CF-28,2	20.8 9	20.9	20.8 7	20.886666 7	51.4	52.1	52.5	52	212. 1	24.968		0	4035.41755 7
CF-28,3	20.9 4	20.9 6	21.1 1	21.003333 3	53.3 5	53.6 5	53.6 5	53.55		0	88.4	2.57873200 5	3918.61275 4
CF-28,7	20.9 1	20.9 1	20.9 2	20.913333 3	53.4	53.9 5	54.3	53.883333 3		0	81.2	2.36869953 4	3894.37141 3
CF-28,1	20.9 5	21	20.9 4	20.963333 3	53.7 5	53.4 5	53.3	53.5	227. 2	26.745 5		0	3922.27500 9
CF-28,4	20.8 5	20.9 1	20.8 7	20.876666 7	54.2 5	53.8 5	54.2	54.1	210. 7	24.803 2		0	3878.77473 1
CF-28,5	21.0 3	21.0 7	20.9 8	21.026666 7	54.1 5	53.9 5	53.9 5	54.016666 7		0	86.4	2.52038965 2	3884.75864 8

CONCRETO CON FIBRA DE FIQUE DE 30 mm (CF30)

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [□seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CF3-3,2	21.0 2	20.9 8	20.9 7	20.99	56.3 5	56.3 5	56.5	56.4	110. 6	13.019 6		0	3720.59774 8
CF3-3,5	20.9 9	20.9 6	20.9 3	20.96	57.4	57.1 5	57.5	57.35	120. 8	14.220 3		0	3658.96622 4
CF3-3,4	21.0 8	21.0 8	21.0 9	21.083333 3	57.1	56.6 5	57.1 5	56.966666 7	119. 5	14.067 3		0	3683.58770 6
CF3-3,3	21.1 8	21.1 4	21.1 9	21.17	57.0 5	56.7 5	57.3 5	57.05		0	59.9	1.74735347 4	3678.20706 3
CF3-3,1	21	20.9 9	20.9 8	20.99	56.1 5	56.4 5	57.5 5	56.716666 7		0	69	2.01281118	3699.82450 1
CF3-3,6	20.8 9	20.9 2	20.8 7	20.893333 3	57.0 5	56.4 5	57.3 5	56.95		0	60.6	1.76777329 7	3684.66572 4

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CF3-7,6	21.0 9	21.0 9	21.0 8	21.086666 7	54.2	54.0 5	54.2 5	54.166666 7	156. 8	18.458 2		0	3874.00085 5
CF3-7,4	21.0 3	21	21.0 1	21.013333 3	56.7	55.6 5	57.3	56.55	150. 6	17.728 3		0	3710.72878 8
CF3-7,1	21.0 8	21.0 6	21.0 7	21.07	54.2 5	54.5	54.7 5	54.5	146. 9	17.292 8		0	3850.30666
CF3-7,5	21.0 6	21.0 7	21.0 8	21.07	57.3 5	57.5	57.5	57.45		0	77.9	2.27243465 1	3652.59726 7
CF3-7,2	21.0 4	21	21.0 1	21.016666 7	55.4 5	55.6 5	55.6	55.566666 7		0	84.4	2.46204729 9	3776.39555 4
CF3-7,3	21	21.0 3	21.0 1	21.013333 3	54.3 5	54.7 5	54.6	54.566666 7		0	85.2	2.48538424	3845.60255 9

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CF-14,1	20.8 9	20.9	20.8 7	20.886666 7	51.7	51.6	52.1 5	51.816666 7		0	90.3	2.63415724	4049.69532 9
CF-14,2	20.9 4	20.9 6	21.1 1	21.003333 3	54.2 5	52.8	53.5	53.516666 7		0	86.9	2.53497524	3921.05349 7
CF-14,3	20.9 1	20.9 1	20.9 2	20.913333 3	52.6 5	53.1 5	52.6	52.8		0	70.4	2.05365082 7	3974.27486 7
CF-14,4	20.9 5	21	20.9 3	20.96	53.6	53.7	53.5 5	53.616666 7	157. 2	18.505 3		0	3913.74037 2
CF-14,5	20.8 5	20.9 1	20.8 7	20.876666 7	54.1 5	54.1 5	53.8	54.033333 3	160. 9	18.940 8		0	3883.56038 8

CF-14,6	21.0 3	21.0 7	20.9 8	21.026666 7	53.1 5	53.7 5	52.8 5	53.25	162. 1	19.082 1		0	3940.68944 5
---------	-----------	-----------	-----------	----------------	-----------	-----------	-----------	-------	-----------	-------------	--	---	-----------------

PROBET A	DISTANCIA [cm]			Distancia promedio	TIEMPO [seg]			Tiempo promedio	COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		VPU [m/s]
	1	2	3		1	2	3		[KN]	[MPa]	[KN]	[MPa]	
CF-28,1	21.1 4	21.09	20.9 5	21.06	51.5 5	50.8	51.2 5	51.2		0	79.7	2.32494276 9	4098.47095 6
CF-28,2	21.0 5	21.02 1	21.0 9	21.053666 7	53.2 5	53.6	54.0 5	53.633333 3		0	75.9	2.21409229 8	3912.52417
CF-28,3	20.9 5	20.98	21.0 2	20.983333 3	53.7 5	53.8 5	53.9	53.833333 3	184. 4	21.707 2		0	3897.98847 6
CF-28,4	20.9 8	21.02	20.9 6	20.986666 7	52.8	53.7 5	52.7 5	53.1	181. 5	21.365 8		0	3951.82133 6
CF-28,5	21.0 4	21.06	21.0 7	21.056666 7	52.7	53	53.7	53.133333 3		0	82	2.39203647 5	3949.34215 1
CF-28,6	21.0 3	21.06	21.0 3	21.04	52.7 5	53.5 5	52.2 5	52.85	182. 1	21.436 4		0	3970.51490 9

ANEXO C. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

- Si la fractura se inició en la superficie sometida a tensión dentro del tercio medio de la distancia entre apoyos se calculó el módulo de rotura, como sigue:

$$R = PL/bd^2$$

Donde:

R = módulo de rotura, MPa (psi).

P = carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N, (lbf).

L = distancia entre apoyos, mm (pulgadas).

b = ancho promedio de la fractura, mm (pulgadas).

d = altura promedio del espécimen en el lugar de la fractura, mm (pulgadas).

Ej; Probeta CS-3,1:

$$R = \frac{6189,78N * 300mm}{102,9mm * (101,3mm)^2} = 1,75857 MPa$$

- Si la fractura ocurre en la superficie de tensión por fuera del tercio medio de la distancia entre los apoyos, en no más de un 5% de ésta, el módulo de rotura se calcula como sigue:

$$R = 3Pa/bd^2$$

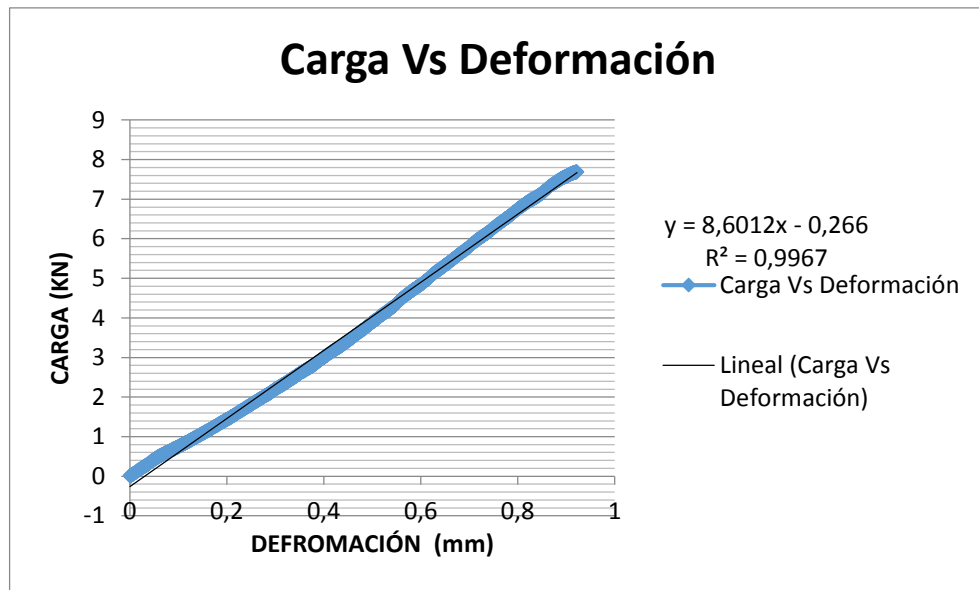
Donde:

a = distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de la viga sometida a tensión, mm (pulgadas).

Ej; Probeta CS-14,2:

$$R = \frac{3 * 7634,2235N * 96,44mm}{99,96mm * (100,95mm)^2} = 2,16815MPa$$

El valor de la carga P utilizada para el cálculo del módulo de rotura se determinó a partir de la gráfica obtenida en el ensayo de flexión para cada una de las viguetas como se muestra en la siguiente gráfica, la cual corresponde a una probeta adicionada con fibra de fique de 10 mm de longitud ensayada el día 14 de curado.



MÓDULO DE ROTURA (Concreto Simple)								
Probet a	CS-3,1	CS-3,2	CS-7,1	CS-7,2	CS-14,1	CS-14,2	CS-28,1	CS-28,2
P	6189.78	6151.4	7198.14	7977.44	7833.83	7634.22	7809.26	7536.93
L	300	300	300	300	300	300	300	300
b	102.9	101.7	100.08	100	100.38	99.96	101.4	100.3
d	101.3	99.8	100.04	101.1	100.92	100.95	103	101
R	1.76	1.82	2.15	2.34	2.29	2.17	2.18	2.21
a						96.44		

MÓDULO DE ROTURA (Concreto con fique de 10mm)								
Probeta	CF10-3,1	CF10-3,2	CF10-7,1	CF10-7,2	CF10-14,1	CF10-14,2	CF10-28,1	CF10-28,2
P	6188.21	6211.91	7335.33	7453.53	7690.96	8551.25	8433.71	8220.19
L	300	300	300	300	300	300	300	300
b	101.67	100.7	105.7	101.2	100.4	100.3	101.02	100.45
d	101.3	101.3	101.2	101.2	100.4	101	99.94	100.28
R	1.57	1.80	2.03	2.16	2.28	2.51	2.51	2.44
a	88.38							

MÓDULO DE ROTURA (Concreto con fique de 30mm)								
Probeta	CF30-3,1	CF30-3,2	CF30-7,1	CF30-7,2	CF30-14,1	CF30-14,2	CF30-28,1	C30-28,2
P	6222.56	6670.47	7680.96	7095.17	9744.49	9054.98	9142.97	8324.48
L	300	300	300	300	300	300	300	300

b	101.1	100.4	101.4	100.2	100.21	99.92	99.1	101
d	101.1	102	101.5	101.9	101.46	102.34	100.8	102.3
R	1.81	1.92	2.21	2.04	2.83	2.59	2.51	2.36
a							0	92.3