

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto

**MATERIAL COMPUESTO FRCM DE CABUYA: MEJORA DE ADHERENCIA
MEDIANTE LA REDISTRIBUCIÓN DE LOS HILOS DEL TEJIDO DE REFUERZO**

Autor(es):

Cristian Andrés Marcillo Zapata – Andrea Michelle Miño Vizuete

Tutor:

Ing. Oscar Cevallos Ph.D.

Riobamba - Ecuador

Año 2017

REVISIÓN

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: “MATERIAL COMPUESTO FRCM DE CABUYA: MEJORA DE ADHERENCIA MEDIANTE LA REDISTRIBUCIÓN DE LOS HILOS DEL TEJIDO DE REFUERZO” presentado por Cristian Andrés Marcillo Zapata y Andrea Michelle Miño Vizuite y dirigida por: Ing. Oscar Cevallos Ph.D. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Oscar Cevallos Ph.D.
Director del proyecto



.....
Firma

Ing. Oscar Paredes
Miembro del tribunal



.....
Firma

Ing. Alexis Martínez
Miembro del tribunal



.....
Firma

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ing. Oscar Cevallos, en calidad de Tutor de Tesis, cuyo tema es: “MATERIAL COMPUESTO FRCM DE CABUYA: MEJORA DE ADHERENCIA MEDIANTE LA REDISTRIBUCIÓN DE LOS HILOS DEL TEJIDO DE REFUERZO”, CERTIFICO; que el informe final del trabajo investigativo, ha sido revisado y corregido, razón por la cual autorizo a los estudiantes Cristian Andrés Marcillo Zapata y Andrea Michelle Miño Vizuite para que se presenten ante el tribunal de defensa respectivo para que se lleve a cabo la sustentación de su Tesis.

Atentamente,



.....
Ing. Oscar Cevallos Ph.D.
Tutor de tesis

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, corresponde exclusivamente a: Cristian Andrés Marcillo Zapata, Andrea Michelle Miño Vizuite e Ing. Oscar Cevallos; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



.....
Cristian Andrés Marcillo Zapata
C.I. 060387763-0



.....
Andrea Michelle Miño Vizuite
C.I. 060408049-9

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Oscar Cevallos Ph.D., tutor de la tesis, por su ayuda y consejos en cada paso de la realización del presente trabajo de investigación.

A mis papas por su apoyo tanto moral como económico, durante toda la vida estudiantil, su tenacidad y lucha interminables han hecho de ellos un gran ejemplo a seguir para mí, sin ellos no hubiera conseguido lo que hasta ahora. Gracias por su amor.

De la misma manera a mi amiga Tita coautora del presente trabajo de investigación por contar con la tranquilidad suficiente para calmar los humos en los momentos más difíciles de trabajo. También a su familia por mantener siempre la puerta de su casa abierta y compartir muchas vivencias.

Por último pero no menos importante a mis amigos Alexis, Jonathan, Álvaro, Édison, Stalin, y Majitos, por su amistad y ayuda desinteresada, el tiempo compartido con ellos ha sido gratificante.

Cristian Andrés Marcillo Zapata

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por estar en cada etapa de mi vida, por ayudarme a cumplir el sueño de ser profesional e impulsarme a seguir adelante y nunca darme por vencida. También quiero agradecer a mi Bart por siempre estar a mi lado, ser mi compañía y ser mi amigo fiel siempre.

Agradezco al Ing. Oscar Cevallos por ser nuestro tutor y enseñarnos, ayudarnos y compartirnos su conocimiento a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación.

Agradezco a mi amigo Chucho por hacer esta tesis conmigo, por lograr todos nuestros objetivos juntos, por todo su trabajo y apoyo.

Agradezco a mi familia, a mi hermano Rolo por sus consejos, a mi tía Marty y a mi primo Sebas por estar siempre pendientes de nosotros.

Por último quiero agradecer a mis amigos Majitos, Alvarito, Édison, Alexis, Stalin y Jonathan por ayudarnos en los momentos que más necesitábamos.

Andrea Michelle Miño Vizquete

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a mi familia, en especial a mi mamá y a mi papá por su apoyo y amor incondicional, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento.

Esto es posible gracias a ustedes.

Cristian Andrés Marcillo Zapata

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mi familia. A mi mamá, por su amor inmenso, por ser incondicional y estar conmigo siempre que lo necesito. A mi papá por brindarme su conocimiento, ayudarme con mis tareas, por ser el mejor papá que pude haber pedido. También a mi Bart por nunca dejar de estar a mi lado y por ser una luz en mi vida.

Andrea Michelle Miño Vizquete

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCION	1
2	OBJETIVOS	4
	2.1 Objetivo General	4
	2.2 Objetivos Específicos	4
3	MARCO TEORICO	5
4	METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	7
	4.1 Materiales	8
	4.2. Métodos	11
5	RESULTADOS Y DISCUSION	21
	5.1 Tejido de cabuya diseñado	21
	5.2 Ensayo Single Lap Shear (SLS)	23
	5.3 Prueba de pull-off	32
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
7	BIBLIOGRAFIA	39
8	ANEXOS	44
	8.1 Dosificaciones de mortero y hormigón	44
	8.2 Caracterización física del tejido de rollo longitudinal y transversal	45
	8.3 Caracterización física del tejido de saco longitudinal y transversal	49
	8.4 Caracterización física del tejido diseñado longitudinal y transversal	53
	8.5 Resumen de tracción en hilos	57

8.6 Resumen de tracción en tejidos	63
8.7 Caracterización física del material compuesto.....	69
8.8 Propiedades mecánicas de material compuesto	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de hilos y tejidos	14
Tabla 2. Caracterización del material compuesto FRCM	17
Tabla 3. Análisis ANOVA de una vía para independencia de datos obtenidos entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco y materiales compuestos reforzados con tejido diseñado.	29
Tabla 4 Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de datos obtenidos entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco y materiales compuestos reforzados con tejido diseñado	29
Tabla 5. Análisis ANOVA de una vía para independencia de resultados obtenidos entre los grupos de material compuesto reforzado con tejido diseñado.	30
Tabla 6. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos entre los grupos de materiales compuestos reforzados con tejido diseñado.	30
Tabla 7. Análisis ANOVA de una vía para independencia de resultados obtenidos entre grupos de materiales compuestos reforzados con tejido de saco.	31
Tabla 8. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos entre grupos de materiales compuestos reforzados con tejido de saco.	31
Tabla 9. Resultados de ensayo de pull-off en materiales compuestos reforzados con tejido de saco y tejido diseñado.	34
Tabla 10. Análisis ANOVA de una vía para independencia de los resultados obtenidos en la prueba de pull-off entre materiales compuestos reforzados con tejido de diseñado.	35
Tabla 11. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos en la prueba pull-off entre materiales compuestos reforzados con tejido diseñado.	35
Tabla 12. Análisis ANOVA de una vía para independencia de resultados obtenidos en la prueba de pull-off entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco.	36

Tabla 13. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos en la prueba pull-off entre grupos de materiales compuestos reforzados con tejido de saco..... 36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tejidos de cabuya usados en la investigación: (a) tejido de rollo, (b) tejido de saco	9
<i>Figura 2. Tejido diseñado de urdimbre tipo semi-esterila.</i>	<i>13</i>
Figura 3. Tejido diseñado	13
Figura 4. Ensayo de tracción de material compuesto FRCM reforzado con tejido de saco y tejido diseñado.	16
Figura 5. Ensayo de flexión para material compuesto FRCM reforzado con tejido de saco y tejido diseñado.	16
Figura 6. Prueba SLS: (a) Esquema set up ensayo vista frontal. (b) Esquema set up ensayo vista isométrica. (c) Probeta de 20 cm de longitud con tejido diseñado para ensayo.	18
Figura 7. Equipo usado para el ensayo de pull-off.	19
Figura 8. Tipos de fallas posibles en el ensayo pull-off.	20
Figura 9. Ensayo SLS en materiales compuestos reforzados con tejido diseñado: (a) Curva característica carga-deslizamiento. (b) Curva característica esfuerzo-deslizamiento.	24
Figura 10. Ensayo SLS: Falla del tejido fuera del material compuesto reforzado con tejido diseñado.	25
Figura 11. Ensayo SLS en materiales compuestos reforzados con tejido de saco: (a) Curva característica carga-deslizamiento. (b) Curva característica esfuerzo-deslizamiento.	26
Figura 12. Curva generalizada carga-deslizamiento de la prueba de Single Lap Shear.	26
Figura 13. Etapas del mecanismo de transferencia de carga del ensayo SLS: (a) Punto A. (b) Punto B. (c) Tramo B-C. (d) Punto C. (e) Punto D. (f) Punto E.	27
Figura 14. Resultados de las cargas máximas en el ensayo SLS de las muestras reforzados con tejido de saco y diseñado en función de la longitud de pegado.	28
Figura 15. Variación de la energía de fractura entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco y tejido diseñado	32

Figura 16. Resultados promedios de esfuerzos máximos en el ensayo pull-off en losas de alta, normal y baja resistencia con muestras reforzados con tejido de saco y diseñado. 35

RESUMEN

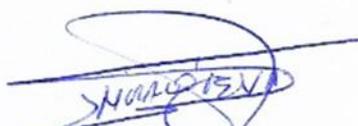
Los materiales compuestos FRCM (fiber reinforced cementitious matrix composites) reforzados con fibras naturales para el fortalecimiento de elementos estructurales han despertado gran interés debido a sus excelentes propiedades mecánicas y a su costo reducido, lo que los ha convertido en potenciales sustitutos de compuestos reforzados con fibras tradicionales. La efectividad de los materiales compuesto FRCM depende, entre otras cosas, de la durabilidad de las fibras y de la capacidad de adherencia de sus componentes. En este estudio se llevó a cabo una investigación experimental acerca de la adherencia de un sistema de reforzamiento FRCM producido con tejidos de cabuya. Al no disponer de tejidos de cabuya adecuados para sistemas compuestos de este tipo, que ofrezcan una capacidad de adherencia satisfactoria, fue necesario el diseño y fabricación de tejidos de cabuya con una configuración de sus hilos mejorada. La eficacia del material compuesto FRCM producido con los tejidos diseñados de cabuya se verificó a través de ensayos de adherencia SLS (Single Lap Shear test) en viguetas de hormigón y de ensayos pull-off en losas de hormigón. Los resultados fueron comparados con los obtenidos en pruebas SLS y pull-off realizadas en vigas y losas reforzadas con materiales FRCM producidos con tejidos de cabuya provenientes de sacos, mismos que se han usado en varias investigaciones previas. Los resultados demuestran que la capacidad de adherencia del sistema es afectada considerablemente por la arquitectura del tejido

.Palabras clave: FRCM, material compuesto, adherencia, tejido de cabuya.

ABSTRACT

The compound materials FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix Composites) reinforced with natural fibers for the strengthening of structural elements have created great interest due to their excellent mechanical properties and their reduced cost, which has turned them into potential substitutes for composites reinforced with traditional fibers. The effectiveness of FRCM composite materials depends, among other things, on the durability of the fibers and the adhesion capacity of their components. In this study an experimental investigation was carried out about the adherence of a FRCM reinforcement system produced with cabuya weave. By not having suitable cabuya weave for composite systems of this type, which offer a satisfactory adhesion capacity, it was necessary to design and manufacture cabuya fabrics with an improved yarn configuration. The efficacy of the FRCM composite material produced with the designed fabrics of cabuya was verified through adherence tests SLS (Single Lap Shear test) on concrete beams and pull-off tests on concrete slabs. The results were compared with those obtained in SLS and pull-off tests performed on beams and slabs reinforced with FRCM materials produced with cabuya weave from sacks, which have been used in several previous investigations. The results show that the adherence capacity of the system is considerably affected by the architecture of the weave.

Key words: FRCM, composite material, adherence, cabuya weave.


Reviewed by: López, Ligia
LANGUAGE CENTER TEACHER



1 INTRODUCCION

Los sistemas de reforzamiento con materiales compuestos nacieron como una solución para incrementar la capacidad de carga y serviciabilidad de una estructura. Sin embargo, desde hace décadas se han desarrollado técnicas que además de reparar deficiencias constructivas mejoran el comportamiento mecánico de la estructura.

Estudios anteriores han proporcionado información sobre un sistema de reforzamiento a base de fibras metálicas o minerales unidireccionales embebidas en una matriz polimérica denominado FRP (Fiber Reinforced Polymer), el cual presenta numerosas ventajas ,entre estas se destacan la resistencia a la corrosión, su fácil y rápida aplicación y una mínima invasión, en contraposición con su inaplicabilidad en superficies húmedas o a bajas temperaturas, pobre compatibilidad térmica con el sustrato de concreto y susceptibilidad a la radiación. (Nanni, 1993)

A la par del sistema FRP surge otra solución tecnológica llamada Concreto Reforzado con Textil TRC (Textile Reinforced Concrete). Este material ofrece la posibilidad de construir elementos estructurales esbeltos, constituidos de varias capas de textiles de fibras de carbono, o de vidrio que están embebidas en mortero. (Hartig, Ulrich, & Schicktanz, 2008)

El sistema compuesto FRCM (Matriz Cementicia Reforzado con Tejido) representa un tipo particular de TRC, donde se aplica una fibra a una estructura a través de un mortero de cemento y se utiliza específicamente para el fortalecimiento de estructuras. Sus propiedades mecánicas dependen de la unión entre fibras y matriz. Este material exhibe varias ventajas tales como: una mayor resistencia a altas temperaturas y a radiaciones ultravioletas, mayor permeabilidad al vapor, menores costos y una reversibilidad completa de la instalación, aumentando también la resistencia a la tracción. (Ombres, 2014)

Desde un punto de vista ambiental, el uso de fibras naturales para producir sistemas compuestos FRCM podría ayudar significativamente a resolver varios problemas de sustentabilidad en la industria de la construcción (en comparación con las fibras sintéticas). Razón por la cual varios investigadores han dirigido su atención hacia el estudio de nuevos materiales basados en fibras naturales y recursos renovables. La aplicabilidad de los sistemas FRCM ha sido comprobada proporcionando un excelente comportamiento a flexión y tracción además de ser un material ligero y poco invasivo. Sin embargo, la adherencia de la matriz con el tejido se considera como uno de los principales problemas de los materiales FRCM a base de tejidos de fibras naturales causando una de las principales fallas, denominada como debonding entre la matriz y el tejido. (Cevallos, Olivito & Codispoti, 2015)

Este hecho se puede comprobar con investigaciones previas (Almache & Tapia, 2016) en donde se describe que una adecuada separación entre hilos, tanto transversales, como, longitudinales, generaría una mejora en la adherencia entre layers o capas de tejidos y matriz.

El problema de adherencia es una clara dificultad para que se usen fibras naturales como reforzamiento en materiales compuestos FRCM; esto a pesar, de que la cabuya ha demostrado tener buenas propiedades mecánicas, como su excelente comportamiento a tracción. En el mercado no existe un tejido de cabuya que favorezca la adherencia en compuestos FRCM, siendo la geometría de sus tejidos una de las principales deficiencias en este sistema de reforzamiento. La adherencia entre matriz y tejido se ve afectada por el exceso de hilos transversales que no aportan en la resistencia a tracción del tejido, y en ciertos casos, esto causa que las tensiones no se distribuyan de manera correcta y se desprenda el tejido de la matriz.

Este trabajo presenta un estudio experimental del comportamiento del sistema FRCM sometido a ensayos de Single Lap Shear (SLS) y pull-off, con la finalidad de mejorar la adherencia entre tejido-matriz y entre sustrato matriz, en función de la redistribución de los hilos del tejido de cabuya.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Elaborar un material compuesto FRCM de cabuya con adherencia mejorada mediante la redistribución de los hilos del tejido de refuerzo.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización de los componentes del material compuesto FRCM y el diseño del tejido de reforzamiento mediante análisis y pruebas de laboratorio para garantizar un adecuado comportamiento del sistema compuesto y penetrabilidad mejorada del tejido.
- Estudiar las propiedades mecánicas del material compuesto mediante pruebas de tracción y flexión para establecer niveles de comportamiento del sistema
- Realizar ensayos de adherencia a corte mediante la prueba Single Lap Shear Test (SLS) y ensayos de resistencia al desprendimiento pull off para comparar el comportamiento mecánico y la adherencia de los materiales compuestos producidos con tejido de cabuya de sacos y comparados con los materiales compuestos fabricados con el tejido diseñado en este estudio.

3 MARCO TEORICO

Las propiedades y el comportamiento de los materiales compuestos dependen directamente de las propiedades de las partes que lo conforman. Es decir, dependen de la matriz, el refuerzo y la interfaz formada entre estos dos elementos. Cada una de estas partes determina un detalle crucial al momento de formar las propiedades globales del compuesto. (Tamayo, 2012)

Los sistemas de refuerzo FRCM poseen dos componentes primarios: la matriz cementícea y una o más mallas de refuerzo conformadas por haces de fibras. La matriz corresponde típicamente a un mortero fino compuesto por cemento portland puzolánico con una baja dosis de polímeros secos, una arena fina de granulometría continua y con una adición de microfibras para asegurar un desempeño tixotrópico en estado fresco y controlar la microfisuración asociada a la retracción del mortero. (Sandoval , 2014)

Muchos son los estudios realizados acerca de los materiales FRCM reforzados con fibras inorgánicas, especialmente para reforzar mampostería. Generalmente, las fibras de PBO (polipropileno) son las más utilizadas. El sistema PBO-FRCM resultó ser un método efectivo para elevar la capacidad de carga de elementos a compresión en especial en concretos de resistencia baja. Sin embargo, el inconveniente más frecuente es la falta de adhesión entre la fibra de PBO y la matriz, invitando a que el tejido de esta fibra sea modificado libremente (Trapko, 2014). De la misma manera, otro estudio (Carozzi, Colombi, Fava, & Poggi, 2016), menciona que la evidencia experimental reconoce que el modo de falla del sistema PBO-FRCM con el sustrato es debido al deslizamiento de la fibra conocido como debonding a causa de una adherencia pobre.

Las fibras naturales han recibido mucha atención como sustituto de las fibras sintéticas para refuerzo. Una matriz inorgánica como el cemento favorece su unión con las fibras naturales, pero aun así existen otros parámetros que influyen en gran parte en el comportamiento mecánico de

estos compuestos. La longitud de la fibra, su diámetro, la orientación y la interface de las fibras tienen efectos significativos en su desempeño a tracción, flexión y fatiga. (Cevallos & Olivito, 2014).

La calidad de la adhesión fibra-matriz ha demostrado tener un efecto relevante en la resistencia a fatiga, esto quiere decir que la arquitectura del tejido interviene en propagación de grietas de falla. (Gassan, 2001).

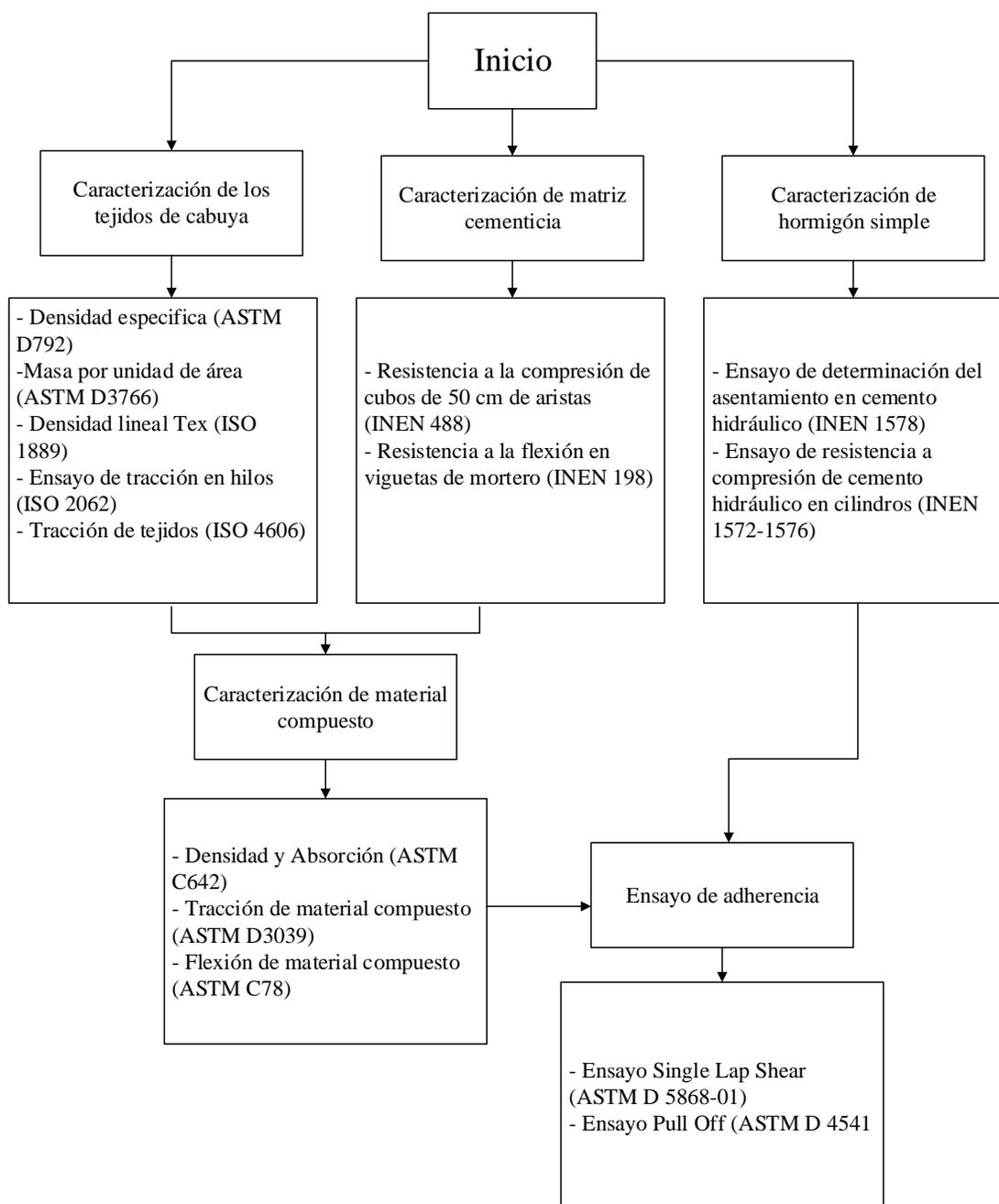
Si se desea trabajar con fibras naturales como parte del refuerzo de una matriz cementicia, se debe prever que el tejido tenga una adecuada separación entre hilos, tanto transversal, como, longitudinalmente, de manera que la matriz penetre totalmente entre los espacios de los hilos de tejido, generando así, una mejor adherencia entre layers o tejidos de fibra natural. (Almache & Tapia, 2016)

La utilización de las fibras de cabuya como refuerzo en una matriz cementicia involucra efectos en su durabilidad. Para evitar este problema se puede impregnar a las fibras con resina poliéster transparente, la cual actúa como un agente repelente del agua y evita la penetración del agua alcalina en los poros de las fibras impidiendo que se descompongan. Para lograr una buena adherencia entre la matriz cementicia y los tejidos de cabuya, se mezcla resina con arena tamizada; con esto se logra de dar rugosidad a la fibra y cumplir con lo antes mencionado (Estrella, 2016).

El uso de la prueba del Single Lap Shear (SLS) para estudiar las características de la adherencia en un compuesto FRCM ha permitido conocer que la falla de debonding generalmente ocurre en la interfaz matriz-tejido en lugar de ocurrir en la interfaz matriz-sustrato, lo cual indica que el sustrato podría no desempeñar un papel importante en el mecanismo de separación del compuesto.

4 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Los niveles de investigación en este proyecto serán: exploratorio y descriptivo. Exploratorio considerando que el mejorar la adherencia entre el sustrato y la matriz en un material compuesto FRCM reforzado con fibras de tejido de cabuya ha sido poco analizado y descriptivo porque los resultados obtenidos aportaran bases para investigaciones futuras.



La investigación se divide en dos fases, la primera enfocada a la caracterización de los tejidos y la segunda para explorar el comportamiento del sistema FRCM propuesto.

El estudio del comportamiento a tracción de hilos simples se realizó mediante ensayos de tracción directa. Se examinó dos tipos de tejidos de cabuya natural: tejido de saco colombiano y tejido de rollo ecuatoriano. Dado la gran variedad de los hilos individuales, se prepararon 10 especímenes de cada tejido. Los hilos son bastante diversos en términos de densidad, grosor, diámetro y orientación en los tejidos (trama o urdimbre). Cada muestra se cortó, midió y peso con el fin de calcular sus propiedades físicas, es decir, la densidad lineal (Tex), densidad y masa por unidad de área así también su resistencia a la tracción

En este punto se comenzó con el diseño del tejido para aplicarse en el compuesto FRCM con los hilos que presentaron los mejores resultados al momento de la caracterización, habiendo favorecido a la penetrabilidad del mortero entre el tejido, esto con el apoyo de investigación bibliográfica en catálogos de fabricantes con respecto a la geometría del tejido (medidas y separaciones). Se visitó la fábrica textilera y se hicieron 2 tejidos diferentes, de los cuales solo 1 arrojó los datos deseados.

4.1 Materiales

- Tejidos de cabuya

El tejido de rollo utilizado en la investigación es de manufactura ecuatoriana y tiene un proceso manual de fabricación. Esto ocasiona que el material presente irregularidades y afecte su comportamiento mecánico. El orden en que se cruzan los hilos de la urdimbre es de tipo tafetán, que se caracteriza por formar un patrón simple de punto cruz. Es un tejido generalmente utilizado

en arreglos ornamentales, razón por la cual se comercializa en rollos de 100m de longitud. El diámetro promedio de sus hilos es de 2 mm y la separación entre hilos longitudinales y transversales es de 3.5 mm (ver fig.1a)

También se usó un tejido de saco, que generalmente se comercializa en los mercados para la venta de productos agrícolas y es de producción colombiana con la materia prima ecuatoriana. Su fabricación es parcialmente industrializada. Al igual que el tejido de rollo, tiene una estructura tipo tafetán. El diámetro promedio de sus hilos es de 2 mm y la separación entre hilos longitudinales y transversales es de 2 mm (ver fig 1b)

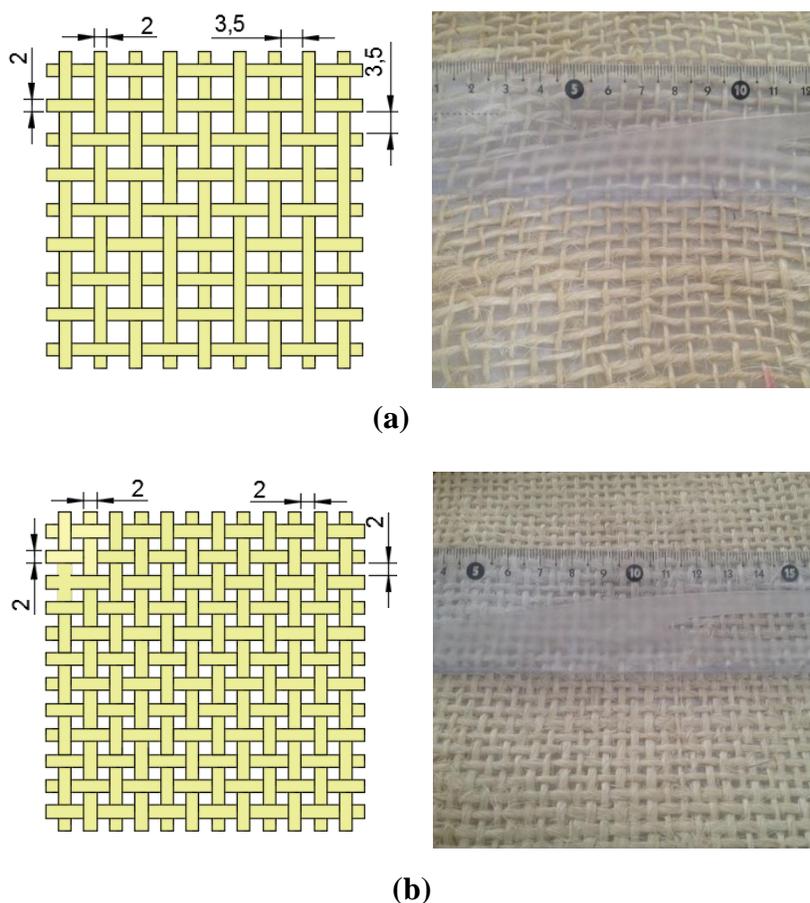


Figura 1. Tejidos de cabuya usados en la investigación: (a) tejido de rollo, (b) tejido de saco

- Mortero

El mortero fue elaborado con cemento portland puzolánico (tipo IP) proveniente de la fábrica Cemento Chimborazo. Como agregado fino se utilizó arena de río de la mina de Penipe tamizada por la malla No.20. Para la obtención de un mortero de alta resistencia se optó por utilizar el aditivo plastificante SikaCem Impermeable disuelto en agua potable. El agregado fino fue secado previamente en el horno a una temperatura de 110 °C por un lapso de 24 horas. Para un mortero con resistencia a la compresión a los 28 días de 45 MPa la dosificación en kg/m³ fue: cemento 1142.86 kg/m³, agregado fino 1257.14 kg/m³, agua 525.71kg/m³, aditivo SikaCem impermeable (según lo recomendado en la ficha técnica)

- Hormigón

El hormigón fue elaborado con cemento portland puzolánico (tipo IP) proveniente de la fábrica Cemento Chimborazo. Como agregado fino se utilizó arena de río de la mina de Penipe tamizada por la malla No. 20 y como agregado grueso se utilizó ripio triturado de la Mina de Cerro Negro tamizado por la malla No. 3/8". Los agregados fueron secados previamente en el horno a una temperatura de 110 °C por un lapso de 24 horas. Se fundieron vigas y losas de hormigón para realizar los ensayos de adherencia en el material compuesto. Para las vigas, la dosificación en kg/m³ fue: cemento 457 kg/m³, agregado fino 764 kg/m³, agregado grueso 1143 kg/m³ y de agua potable 251 kg/m³. Las losas se elaboraron con tres dosificaciones. La losa de alta resistencia (41.890 MPa) fue preparada con una dosificación de: cemento 525 kg/m³, agregado fino 676 kg/m³, agregado grueso 1352 kg/m³ y agua 257 kg/m³. La losa de resistencia normal (23.662 MPa) fue preparada con una dosificación de: cemento 457 kg/m³, agregado fino 764 kg/m³, agregado grueso 1143 kg/m³ y agua 251 kg/m³. La losa de baja resistencia (16.506 MPa) fue preparada con

una dosificación de: cemento 328 kg/m^3 , agregado fino 933 kg/m^3 , agregado grueso 1143 kg/m^3 y agua 220 kg/m^3 .

- **Material compuesto**

El material compuesto utilizado en esta investigación fue preparado con dos materiales, tejido y mortero. El tejido se impregnó con resina poliéster ANDERPOL 859 para evitar que la cabuya se encuentre en contacto directo con el mortero y disminuir los problemas de envejecimiento prematuro (Menna et al., 2015). El material compuesto se encuentra constituido por tres layers de tejido de cabuya mediante un proceso de moldeo manual. Se utilizaron encofrados de madera de 25cm de largo por 5.5 cm de ancho y una altura de 0.8 cm, Se curó durante un lapso de 28 días para que no se generen grietas en la superficie.

4.2. Métodos

- **Caracterización de hilos y tejido**

Para la caracterización física del tejido cabuya se realizaron ensayos, tales como densidad, densidad lineal (TEX), masa por unidad de área. El procedimiento especificado en la norma ASTM D792 (ASTM, 2013b) fue usado para determinar la densidad del tejido, con 10 especímenes (saco y rollo) secos con pesos entre 0.9 a 1.3 gramos que fueron sumergidos en agua destilada por 24 horas. Transcurrido este tiempo, se procede a retirar las muestras del agua destilada y se absorbe el exceso de agua con ayuda de papel absorbente. En una estructura que consta de una balanza y una canastilla, se determinó el peso de la fibra sumergida.

La prueba de densidad lineal (TEX) se basa en la norma ISO 1889 (ISO, 2009a), y usando 10 muestras de 1.5 metros de longitud (saco y rollo) se determinó el peso en una balanza de alta precisión. Utilizando la norma ASTM D3776 (ASTM, 2017a) se realizó el ensayo de masa por

unidad de área, donde se cortaron muestras de tejido de cabuya de 10x10 centímetros, con el mismo número de hilos en los dos sentidos para su posterior pesaje.

La resistencia a tracción de los hilos de cabuya se estudió en base a la norma ISO 2062 (ISO, 2009b). Se utilizaron 10 muestras de hilos longitudinales y 10 muestras de hilos transversales de 65cm de largo (saco y rollo). Para prevenir el deslizamiento durante el ensayo los extremos de los hilos fueron colocados en medio de dos placas de acero unidas con tornillos, los cuales nos dan el efecto de las mordazas durante la prueba. La tracción de los tejidos con resina poliéster realizada bajo la norma ISO 4606 (ISO, 1995), la cual toma 5 muestras de tejido longitudinal y transversal de 30 cm largo por 5 centímetros de ancho (saco y rollo) aseguradas en los extremos por placas metálicas pegadas con resina epóxica. El equipo utilizado para la tracción de muestras fue la máquina multipropósito “Humboldt Master Loader HM-3000”, con una velocidad de 250 mm/min para hilos y 20 mm/min para tejidos.

- **Diseño del tejido**

A partir de los resultados obtenidos de la tracción de los hilos de rollo y saco, se propuso un primer tejido diseñado con una urdimbre tipo semi-esterila (M. Santiago Poveda, 2000). El tejido procedía de una textilera artesanal ubicada en el catón Otavalo, Ecuador.

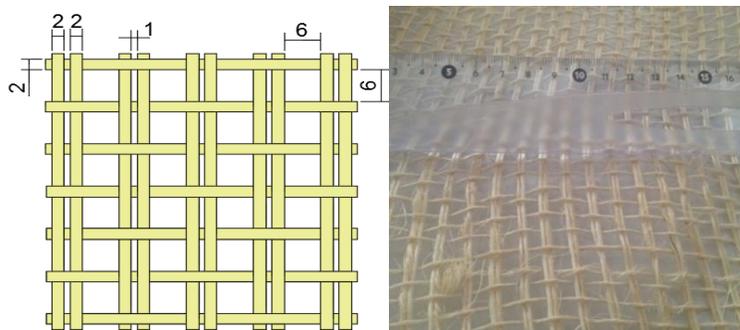


Figura 2. Tejido diseñado de urdimbre tipo semi-esterila.

En Ecuador, las técnicas de elaboración de tejido de cabuya no son industrializadas. En consecuencia, los hilos longitudinales del tejido presentaron fallas a lo largo del hilo doble, sin garantizar una distribución uniforme de las tensiones. Por este motivo, se decidió buscar otro fabricante con procesos de manufactura industrializada. Para facilitar el proceso de producción del tejido se propuso un nuevo diseño con una urdimbre tipo tafetán confeccionada en la fábrica Fideca ubicada en la ciudad San José, Colombia. (ver fig. 3)

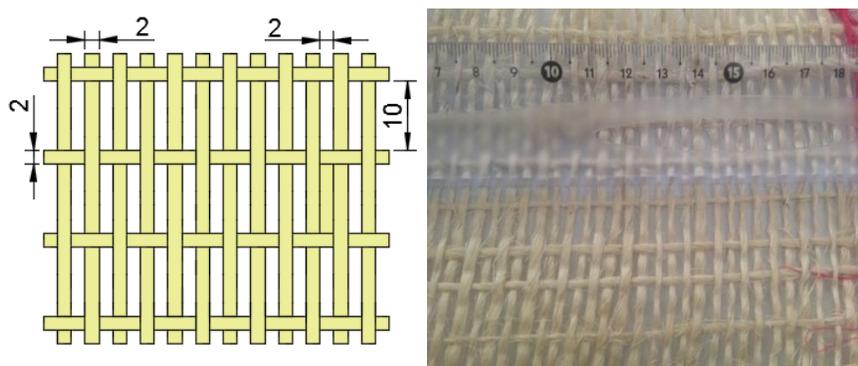


Figura 3. Tejido diseñado

Para la caracterización del tejido diseñado, se usaron las normas y procesos descritos anteriormente para el tejido de rollo y saco. Los resultados obtenidos de la caracterización de hilos y tejidos se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de hilos y tejidos

	Propiedades	Unidad	Rollo		Saco		Diseñado	
Hilos longitudinales	Densidad de la fibra	g/cm ³	1.44	(1.39%)	1.43	(1.40%)	1.47	(4.08%)
	Masa por unidad de área	g/m ²	287.10	(4.14%)	400.50	(2.10%)	278.40	(3.14%)
	Densidad lineal- Tex	g/km	679.50	(11.43%)	773.33	(3.59%)	778.67	(3.54%)
	Esfuerzo máximo a tracción	MPa	382.37	(16.83%)	278.29	(12.28%)	293.96	(15.04%)
	Carga máxima a tracción	N	180.48	(16.83%)	155.42	(12.28%)	155.80	(15.04%)
	Deformación unitaria máxima a tracción	mm/mm	0.04	(23.74%)	0.04	(9.914%)	0.04	(11.30%)
	Módulo de elasticidad	MPa	8778.82	(5.062%)	7311.74	(5.97%)	7939.17	(5.06%)
Hilos transversales	Densidad de la fibra	g/cm ³	1.44	(1.39%)	1.43	(1.40%)	1.47	(4.08%)
	Masa por unidad de área	g/m ²	287.10	(4.14%)	400.50	(2.10%)	278.40	(3.14%)
	Densidad lineal- Tex	g/km	846.67	(3.91%)	821.43	(12.71%)	824.29	(11.05%)
	Esfuerzo máximo	MPa	259.33	(22.47%)	303.51	(17.15%)	304.64	(16.10%)
	Carga máxima	N	144.01	(22.47%)	174.22	(17.15%)	170.90	(16.10%)
	Deformación unitaria máxima	mm/mm	0.05	(21.87%)	0.05	(9.36%)	0.05	(7.80%)
	Módulo de elasticidad	MPa	4835.73	(11.61%)	6232.09	(9.18%)	6262.26	(32.09%)
Tejidos longitudinales	Esfuerzo máximo a tracción	MPa	118.30	(8.51%)	306.77	(5.02%)	321.64	(10.88%)
	Carga máxima a tracción	N	558.38	(8.51%)	1990.77	(6.56%)	2045.66	(10.88%)
	Deformación unitaria máxima	mm/mm	0.04	(9.08%)	0.05	(5.02%)	0.05	(13.72%)
	Módulo de elasticidad	MPa	3771.60	(22.13%)	6629.38	(2.60%)	7195.33	(12.48%)
Tejidos transversales	Esfuerzo máximo a tracción	MPa	130.94	(17.62%)	275.40	(22.51%)	267.13	(26.44%)
	Carga máxima a tracción	N	611.40	(17.62%)	1898.34	(22.51%)	599.45	(26.44%)
	Deformación unitaria máxima	mm/mm	0.03	(11.24%)	0.05	(10.69%)	0.05	(21.68%)
	Módulo de elasticidad	MPa	5387.36	(35.98%)	5662.59	(19.64%)	6314.94	(15.76%)

Nota: los coeficientes de variación se presentan entre paréntesis

- Caracterización del material compuesto FRCM

Una de las propiedades físicas del material compuesto es la densidad. Tomando como referencia la norma ASTM C642 (ASTM, 2013a) se colocaron seis muestras en agua durante 24 horas. Posteriormente se retiraron las probetas del agua y con la ayuda de una franela se secaron

hasta dejarlos en un estado SSS. Se colocó un recipiente graduado sobre una balanza y se llenó con agua hasta la marca de calibración (masa 1). Se registró la masa. Después se colocó la muestra en el recipiente y se tomó la marca de calibración 2. Posteriormente se retiró la muestra del recipiente y se vertió agua hasta la marca de calibración 2 y se registró la masa.

$$\delta = \frac{S}{R-T} \text{ (eq. 1)}$$

Dónde: δ = Densidad del mortero, en g/cm^3 , S = Masa de la muestra seca, en g., R = Masa del recipiente +agua en la segunda lectura, en g. y T = Masa del recipiente +agua en la primera lectura, en g.

La norma ASTM C642 (ASTM, 2013a) también hace referencia al porcentaje de absorción del material compuesto, el cual se determinó sumergiendo seis muestras por 24 horas. Luego con ayuda de una franela se las dejó en un estado SSS y se registró su peso. Al finalizar el paso anterior se colocaron las muestras dentro del horno a una temperatura de 110°C por 24 horas y se registró su peso seco.

$$\%Absorción = \frac{(W-D)}{D} * 100 \text{ (eq. 2)}$$

Dónde: W = masa de la muestra en estado SSS, en g. y D = masa de la muestra seca, en g.

Para la prueba de tracción en materiales compuestos se usó una modificación de la norma ASTM D3039 (ASTM, 2014a). En los extremos de seis muestras se pegaron placas de acero de 5x12cm con resina epóxica. Uno de los parámetros a tomar en cuenta es el agarre usado. El agarre tipo horquilla reduce los momentos de flexión dándole a la muestra varios grados de libertad y un soporte final (ver fig. 4). Para este ensayo se utilizó la máquina multipropósito “Humboldt Master Loader HM-3000” con una velocidad de 0.5mm/min.



Figura 4. Ensayo de tracción de material compuesto FRCM reforzado con tejido de saco y tejido diseñado.

La última prueba realizada en los materiales compuestos fue el ensayo a flexión adaptado de la norma ASTM C78 (ASTM, 2002), donde se aplicó carga en el centro la luz de seis muestras simplemente apoyadas. La velocidad de ensayo con la que fue programada la máquina multipropósito “Humboldt Master Loader HM-3000” fue de 0.5mm/min.

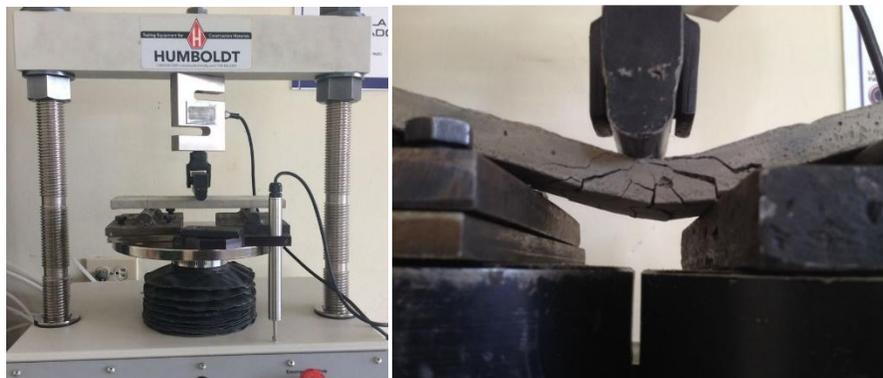


Figura 5. Ensayo de flexión para material compuesto FRCM reforzado con tejido de saco y tejido diseñado.

Los resultados obtenidos por los ensayos en los materiales compuestos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización del material compuesto FRCM

Propiedades	Unidad	Tejido saco (3 layers) (a)	Tejido diseñado (3 layers)	
Densidad en estado endurecido	g/cm ³	1.829	1.786	(2.20%)
Absorción en estado endurecido	%	12.322	14.231	(2.38%)
Ensayo de Tracción	Unidad	Tejido saco (3 layers) (a)	Tejido diseñado (3 layers)	
Esfuerzo máximo	MPa	7.625	12.003	(9.96%)
Carga máxima	N	6104.892	5281.120	(9.96%)
Deformación unitaria máxima	mm/mm	0.047	0.070	(24.75%)
Módulo de elasticidad	MPa	581.007	167.963	(9.71%)
Ensayo de Flexión	Unidad	Tejido saco (3 layers) (a)	Tejido diseñado (3 layers)	
Esfuerzo máximo	MPa	13.846	26.959	(7.74%)
Carga máxima	N	590.759	533.789	(7.75%)
Deformación unitaria máxima	mm/mm	0.386	1.973	(16.44%)
Deflexión Máxima	Mm	7.78	18.786	(7.75%)
Módulo de elasticidad	MPa	785.13	597.961	(24.23%)

Nota: los coeficientes de variación se presentan en paréntesis. (a) Datos tomados del estudio llevado a cabo por Carolina Almache y Darío Tapia (Almache & Tapia, 2016)

- Prueba de SLS

El ensayo Single Lap Shear (SLS) se realizó bajo una modificación de la norma ASTM D5868-01 (ASTM, 2014b). Las muestras se prepararon sobre vigas que fueron previamente tratadas con un disco abrasivo para producir surcos en la superficie. Se usó resina epóxica para mejorar la adherencia entre viga y material compuesto. El material compuesto se aplicó en la superficie mediante un proceso de moldeo manual, con un layer de tejido con resina poliéster. Se elaboraron 12 probetas con tejido diseñado y 12 probetas con tejido de saco, con dimensiones de 5.5cm de ancho por 0.9 cm de espesor y con diferentes longitudes de pegado (tres probetas de 10 cm, tres probetas de 15 cm, tres probetas de 18 cm y tres probetas de 20 cm). En este ensayo la configuración clásica push-pull fue adoptada donde las fibras eran traccionadas mientras que la viga de hormigón era restringida, para lo cual se acopló la muestra a la máquina multipropósito

“Humboldt Master Loader HM-3000” mediante un dispositivo que impide la rotación de la viga y evitar la excentricidad en la carga, tal como se muestra en la figura 6. La velocidad de ensayo fue de 0.3mm/min (Oliveira, Ghiassi, & Lourenço, 2014).

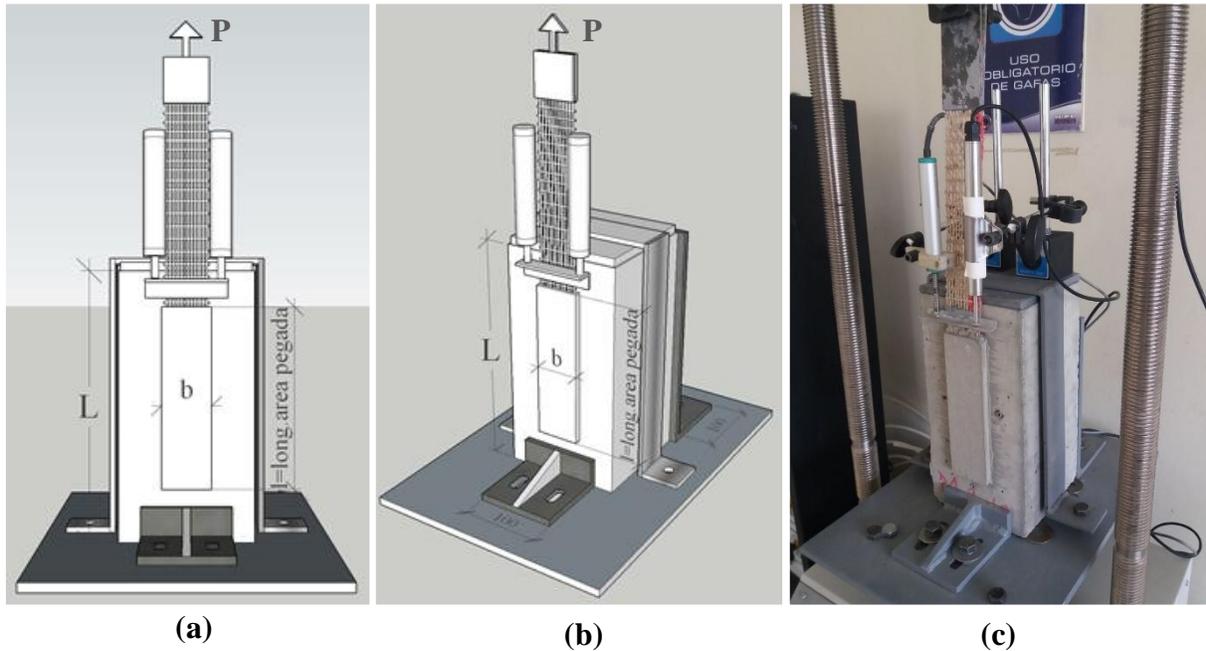


Figura 6. Prueba SLS: (a) Esquema set up ensayo vista frontal. (b) Esquema set up ensayo vista isométrica. (c) Probeta de 20 cm de longitud con tejido diseñado para ensayo.

Para realizar los cálculos de esfuerzos y energía de fractura se utilizaron las siguientes fórmulas

$$\sigma_{sls} = \frac{P}{n \cdot a_{tl}} \quad (\text{eq. 3})$$

$$G = \frac{P_{max}^2}{b^2 \cdot 2E \cdot t} \quad (\text{eq. 4})$$

La ecuación 3 fue tomada del estudio de (D’Antino, Carloni, Sneed, & Pellegrino, 2014), donde: σ_{sls} = Esfuerzo SLS (MPa), P = carga aplicada (N), n = número de layers del material compuesto y a_{tl} = área del tejido longitudinal sometido a tracción (mm^2). La ecuación 4 fue referenciada a la norma CNR-DT 200 (CNR, 2013), donde G = energía de fractura (N/mm), P_{max} = carga máxima aplicada (N), b = ancho del material compuesto (mm), E = módulo de elasticidad del material compuesto en la zona 3 (MPa) y t = espesor del material compuesto (mm).

- Prueba de pull-off

El ensayo de pull-off se aplicó en tres losas de hormigón (resistencia baja 16.506 MPa, resistencia normal 23.662 MPa, Resistencia alta 41.890 MPa) que fueron reforzadas con materiales compuestos FRCM de cabuya luego de 7 días de haber sido elaboradas. La superficie de cada losa fue preparada con un disco abrasivo para crear surcos que en conjunto con resina epóxica mejora la adherencia entre losa y material compuesto. El material compuesto contó de dos estratos de mortero y un layer de tejido recubierto con resina poliéster, sumando un espesor de 1cm. La losa se dividió en dos partes, una para colocar el tejido de saco y la otra para colocar el tejido diseñado. Al cabo de 28 días se preparó 10 muestras por cada losa usando una broca diamantada de 5cm de diámetro, se pegaron placas de metal sobre el material compuesto usando resina epóxica y se adaptaron al equipo pull off “LOK-TEST DK 2400”. Se aplicó carga con una velocidad constante controlada manualmente y se siguieron los procedimientos de la norma ASTM D4541 (ASTM, 2017b) que consiste en la aplicación de una tracción directa a un núcleo parcial que moviliza el material de reparación hasta que la falla ocurre.

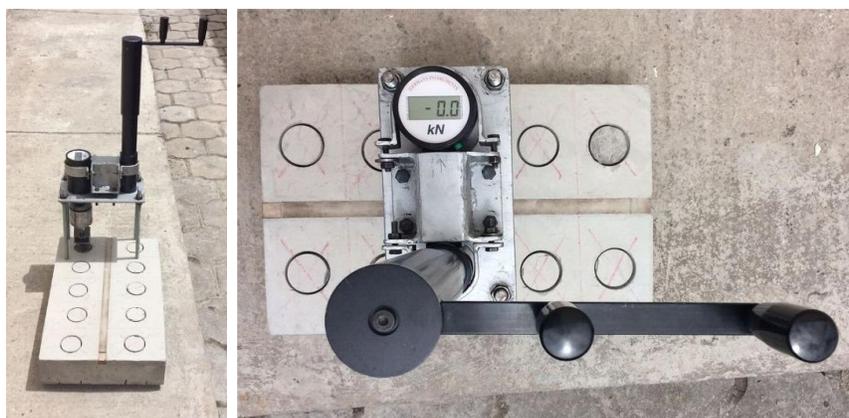


Figura 7. Equipo usado para el ensayo de pull-off.

Los tipos de falla que se pueden presentar en este tipo de ensayo son los que se muestran en la figura 8.

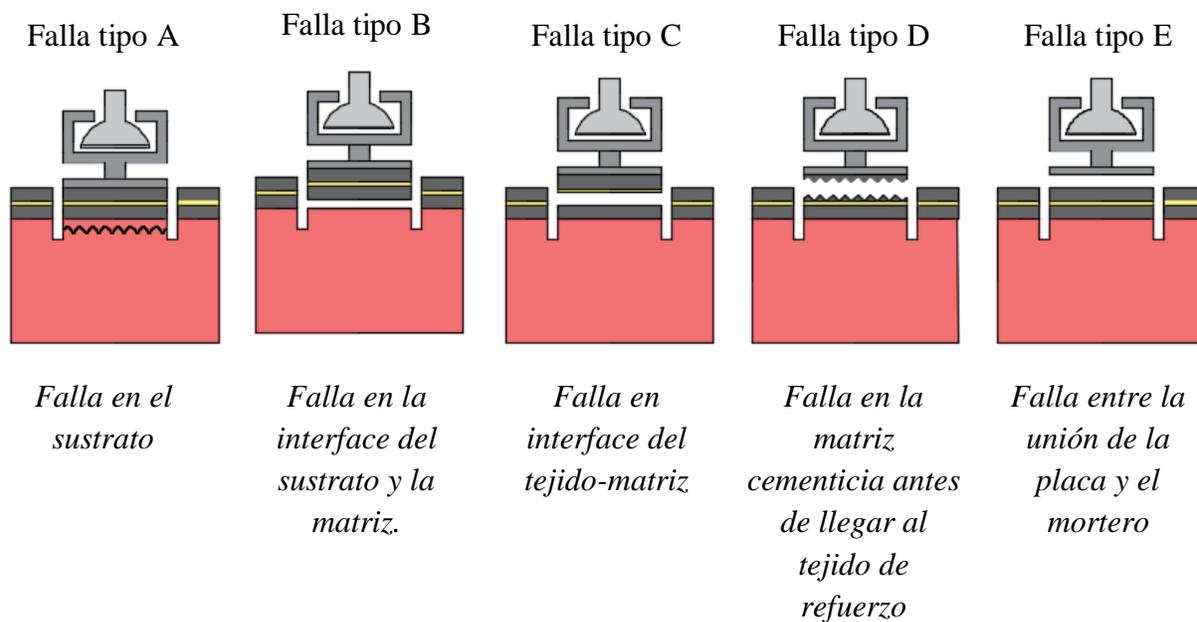


Figura 8. Tipos de fallas posibles en el ensayo pull-off.

- **Análisis y validación de resultados**

Los resultados obtenidos se analizaron con el Modelo de una vía de ANOVA, el cual es un método muy flexible que permite construir modelos estadísticos para el análisis de datos experimentales y se utiliza cuando queremos contrastar más de dos medias. Esta prueba tiene un 95% de confiabilidad. También se utilizó la prueba robusta de igualdad de medias que sirve cuando no es posible asumir que las varianzas poblacionales son iguales.

5 RESULTADOS Y DISCUSION

En los materiales compuestos FRCM, la adherencia sustrato-matriz y tejido-matriz supone un problema para la aplicación práctica del sistema, siendo la arquitectura del tejido un aspecto importante a considerar. En este estudio se examinaron experimentalmente varios tipos de tejidos con el fin de mejorar dicha adherencia. Los ensayos de Single Lap Shear (SLS) y pull-off fueron los ensayos elegidos para estudiar la adherencia del material compuesto.

5.1 Tejido de cabuya diseñado

- Características mecánicas del tejido

Al comparar los resultados presentados en la Tabla 1, se evidencia que las características mecánicas del tejido diseñado y del tejido de saco presentaron similitudes. Esto puede atribuirse a que el número de hilos longitudinales era el mismo (12 hilos de 2 mm de diámetro). Las propiedades de esfuerzo, carga y deformación unitaria tienen una mínima variación entre ellas, sin embargo, el módulo de elasticidad del tejido diseñado tiene un mayor valor. Esto podría deberse a que sus hilos constituyentes también presentan esta característica en relación con los hilos de tejido de saco. El tejido de rollo presentó propiedades mecánicas insuficientes, razón por la cual se descartó su utilización en los ensayos posteriores.

- Ventajas de la arquitectura del tejido

La arquitectura del tejido diseñado ofrece una abertura entre hilos de 2mm por 10mm (ver fig. 3). Por otra parte, el tejido de saco tiene una abertura entre hilos de 2mm por 2 mm (ver fig. 1b), lo que hace que su capacidad de penetración en el mortero sea limitada. Los tejidos de fibras sintéticas (PBO, carbono, vidrio, basalto) comercializadas para aplicaciones de reforzamiento

estructural se caracterizan por tener aberturas amplias (Ruredil, 2017; Sika, 2017), razón por la cual el tejido diseñado sigue este patrón con el fin de mejorar su adherencia.

- Mejora de adherencia en función de la arquitectura del tejido.

En la Tabla 2 se comparan los valores de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con 3 layers de tejido de saco y tejido diseñado. En cuanto a la densidad y la absorción, los resultados son similares. Esto podría deberse a la porosidad del mortero.

Los resultados de la prueba de tracción del material compuesto reforzado con tejido diseñado reflejaron valores de esfuerzo mayores a los del material compuesto reforzado con tejido de saco, a pesar de que su carga máxima alcanzada fue menor. Esto se atribuye al área transversal del material compuesto. En el caso del material compuesto con tejido diseñado el área fue de 440 mm^2 , mientras que el material compuesto con tejido de saco tuvo un área de 800 mm^2 .

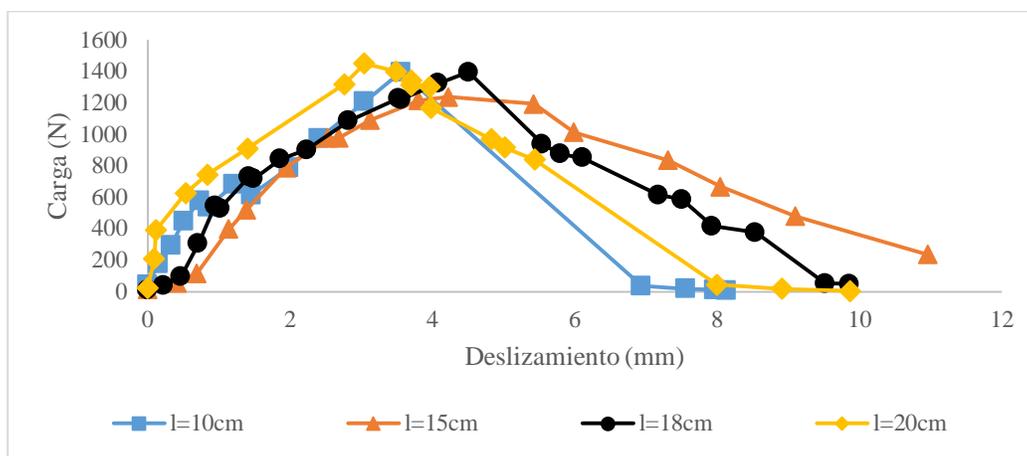
Cuando se analiza el valor del módulo de elasticidad (ver Tabla 2) se puede notar que existen diferencias con respecto a los resultados obtenidos en la prueba a tracción de los tejidos (ver Tabla 1), obteniéndose un mayor el valor del módulo en el material compuesto reforzado con tejido de saco. Esto se podría atribuir a la penetrabilidad del tejido lo que favoreció la distribución de esfuerzos a lo largo del material y se produjo un mayor número de grietas. El material compuesto reforzado con tejido diseñado presentó un promedio de 13 grietas a lo largo de su longitud, en contraste con el material compuesto reforzado con tejido de saco que presentó un promedio de 6 grietas. (Almache & Tapia, 2016)

Por último se compararon los resultados del material compuesto sometido a flexión, arrojando resultados favorables para el material compuesto reforzado con tejido diseñado, llegando a presentar valores de esfuerzo hasta del doble con respecto a las muestras reforzadas con tejido de

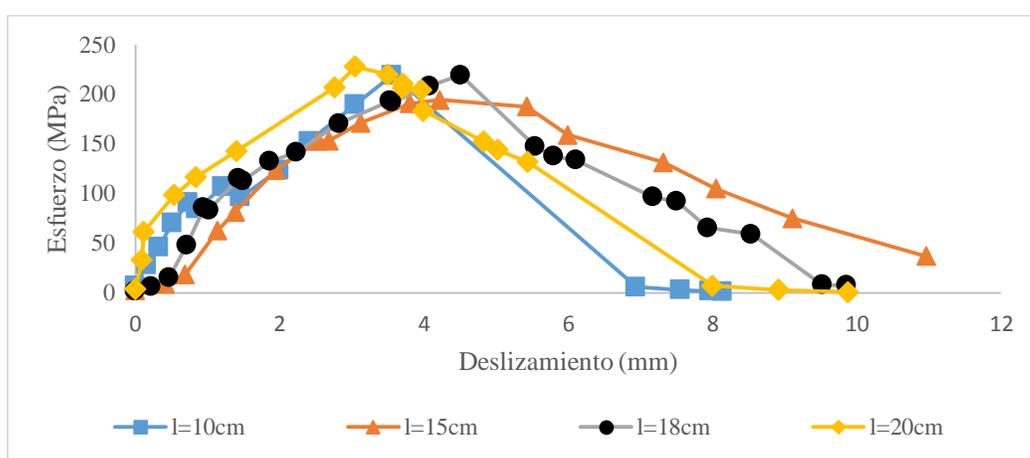
saco. Esto pudo atribuirse a la mayor adherencia que tuvo el tejido con el mortero debido a su mayor penetrabilidad, lo que incrementó el área de contacto entre los estratos de mortero y mejoró las propiedades mecánicas al momento del ensayo. Por otra, parte el módulo de elasticidad permitió ratificar la influencia del mortero en el comportamiento del material compuesto reforzado con tejido diseñado al presentar un valor menor comparado con las muestras reforzadas con tejido de saco. Al tener una mayor contribución del mortero el módulo de elasticidad disminuye ya que las fibras de reforzamiento tienen módulo de elasticidad mayor que el mortero y su contribución afectó a la pendiente de la curva. El material compuesto reforzado con tejido diseñado presentó un promedio de 7 grietas después de ser sometido a flexión, mientras que el material compuesto reforzado con tejido de saco presentó un promedio de 4 grietas (Almache & Tapia, 2016).

5.2 Ensayo Single Lap Shear (SLS)

Para estudiar y comparar el comportamiento de adherencia del tejido de saco y tejido diseñado se optó por realizar el ensayo SLS con diferentes longitudes de pegado del material compuesto. Con los datos obtenidos en este ensayo se obtuvieron curvas de su comportamiento. A continuación, se presentan las curvas carga-deslizamiento y esfuerzo deslizamiento del tejido diseñado.



(a)



(b)

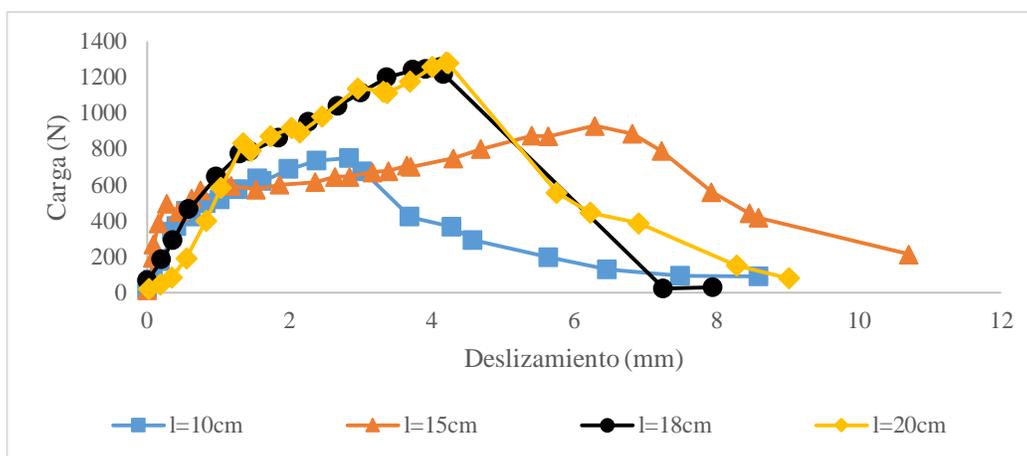
Figura 9. Ensayo SLS en materiales compuestos reforzados con tejido diseñado: (a) Curva característica carga-deslizamiento. (b) Curva característica esfuerzo-deslizamiento.

En estas curvas se observó que la carga en el tejido diseñado no depende de la longitud de pegado del material compuesto. Este resultado puede atribuirse a que la carga del tejido diseñado fue menor a la carga de adherencia entre el material compuesto y el material del sustrato. La falla de la muestra se produjo una vez que el tejido que no estuvo en contacto con el mortero se rompió (ver fig. 10). También se puede notar que las curvas esfuerzo-deslizamiento (ver fig. 9b) son muy similares entre grupos de muestras y la longitud de pegado no afectó la capacidad de deslizamiento del tejido ni su resistencia; el coeficiente de variación fue apenas de 6.93% entre los grupos.

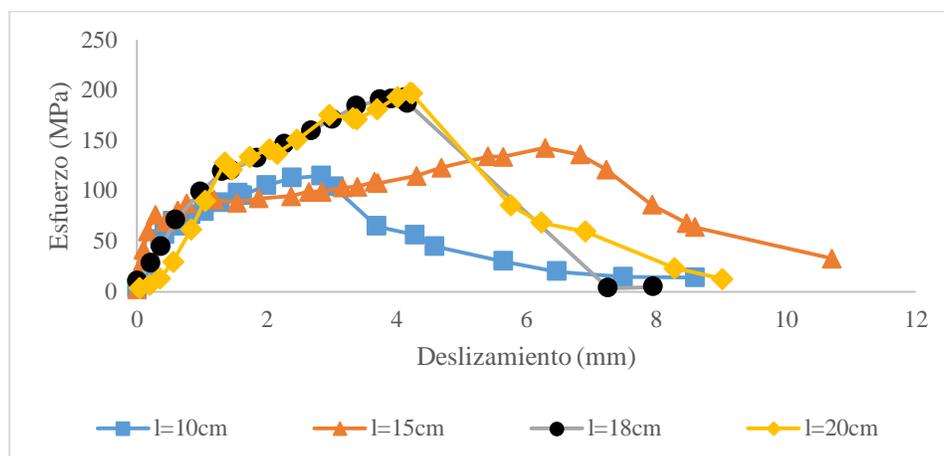


Figura 10. Ensayo SLS: Falla del tejido fuera del material compuesto reforzado con tejido diseñado.

Por otro lado, al analizar los resultados de la prueba SLS realizados en las muestras reforzadas con tejido de saco (ver fig. 11), las muestras tienen un comportamiento diferente entre grupos. La longitud de pegado afectó la adherencia matriz-sustrato y la adherencia matriz-tejido. Esto podría atribuirse a que la longitud de pegado compensó la escasa capacidad de penetrabilidad del tejido y mientras más larga fue la longitud de pegado del material compuesto más adherencia desarrolló el tejido. En longitudes cortas de pegado, como es el caso de las muestras con 10 cm y 15 cm, se tuvo una disminución de la adherencia respecto a las longitudes de pegado de 18 cm y 20 cm, lo que ocasionó el desprendimiento del material antes de alcanzar la carga de falla del tejido.



(a)



(b)

Figura 11. Ensayo SLS en materiales compuestos reforzados con tejido de saco: (a) Curva característica carga-deslizamiento. (b) Curva característica esfuerzo-deslizamiento.

El coeficiente de variación de los resultados de carga y esfuerzo máximas alcanzadas por las muestras reforzadas con tejido de saco fue de 24.43%. Por lo tanto, la longitud de pegado tuvo efecto en su comportamiento.

Las curvas carga-deslizamiento siguen un patrón similar al descrito por (D'Antino, Carloni, Sneed, & Pellegrino, 2014). Este patrón tiene 5 puntos bien diferenciados (ver figs. 12 y 13), cada uno con una reacción mecánica que afectó su comportamiento.

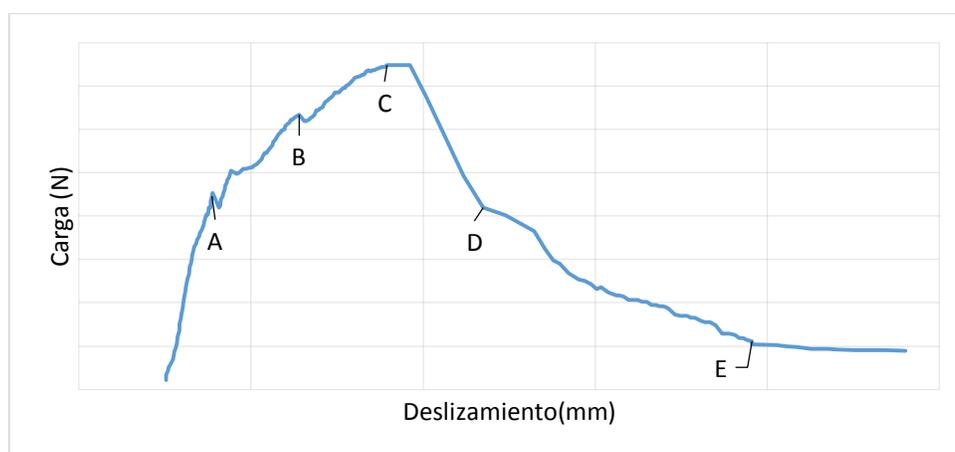


Figura 12. Curva generalizada carga-deslizamiento de la prueba de Single Lap Shear.

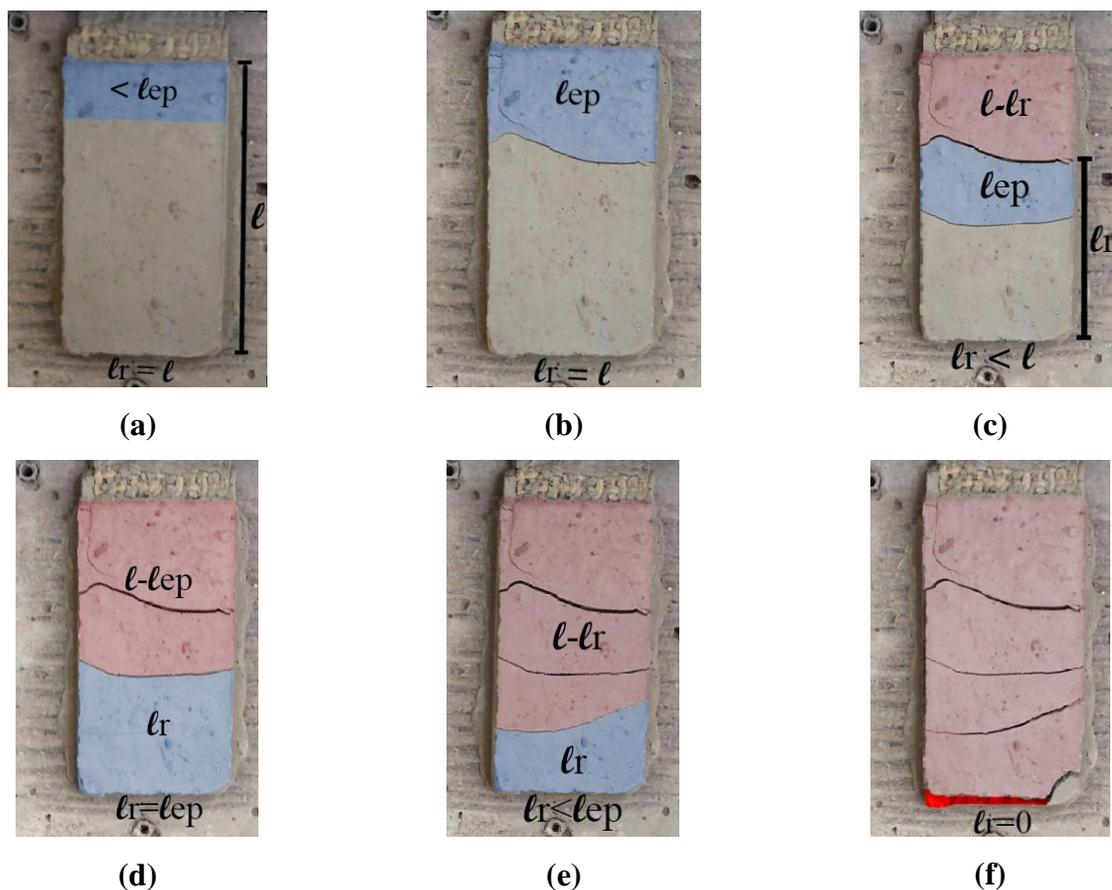


Figura 13. Etapas del mecanismo de transferencia de carga del ensayo SLS: (a) Punto A. (b) Punto B. (c) Tramo B-C. (d) Punto C. (e) Punto D. (f) Punto E.

Nota. Donde l es la longitud del área de pegado, lr es la longitud pegada residual que se define como la longitud actual del área de pegado y lep es la longitud efectiva de pegado que se refiere a la longitud mínima desarrollada para soportar carga..

La primera parte de la curva generalizada (ver fig.12) está representada por un tramo lineal asociado con el comportamiento elástico de la unión entre fibra y matriz. En este punto la longitud pegada residual es igual a la longitud del área de pegado y la longitud efectiva de pegado es menor a la longitud efectiva de pegado donde luego se produce la primera grieta (ver fig. 13a). Después del punto A, la respuesta deja de ser lineal debido a que la interface fibra-matriz experimenta micro-daños y el valor de la carga P aumenta hasta el inicio de la separación de la interface matriz-

fibra, lo que corresponde al punto B, en donde la longitud pegada residual sigue siendo igual a la longitud del área de pegado (ver fig. 13b). En compuestos FRCM la fricción entre fibras y matriz ocurre en la porción del material compuesto donde las fibras se han desprendido, en consecuencia se observa un aumento de carga después de que se produjo el debonding (B), lo cual se denomina punto C. Entre los puntos B Y C la carga incrementa debido a la fricción hasta que el proceso de debonding alcance el fin del área pegada y la longitud de pegado residual es menor a la longitud de área pegada (ver fig. 12c). En el punto C la carga aplicada alcanza su valor máximo y la longitud pegada residual es igual a la longitud efectiva de pegado (ver fig. 13d). Después del punto C la carga aplicada empieza a decrecer debido a que el mecanismo de unión se ha perdido y la longitud pegada residual es menor a la longitud efectiva de pegado (ver fig. 13e). Una vez alcanzado el punto D la concavidad de la curva cambia. En el punto E, la longitud residual es igual a cero, las fibras están totalmente desprendidas de la matriz y la única contribución residual a la carga es proveniente de la fricción; razón por la cual, la respuesta se vuelve constante después del punto E con una carga aplicada asociada solo con la fricción de filamentos y matriz (ver fig. 13f)

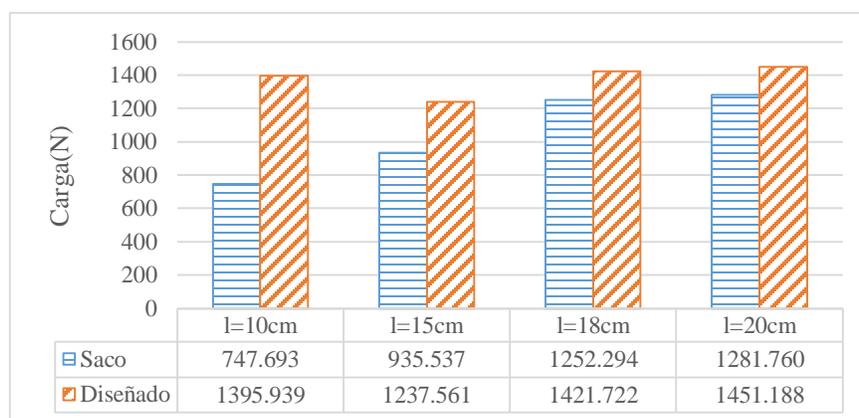


Figura 14. Resultados de las cargas máximas en el ensayo SLS de las muestras reforzados con tejido de saco y diseñado en función de la longitud de pegado.

Cuando se comparan las cargas máximas de las muestras FRCM reforzadas con el tejido diseñado con aquellas reforzadas con tejido de saco (ver fig. 14), es evidente su variabilidad. La adherencia del tejido jugó un papel fundamental en la variación de los resultados, es así que el tejido diseñado alcanzó adherencias con resultados muy similares sin importar su longitud de pegado, lo que no sucedió con el tejido de saco. La comprobación estadística de la independencia de datos se realizó en base a un análisis ANOVA de una vía, tal como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis ANOVA de una vía para independencia de datos obtenidos entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco y materiales compuestos reforzados con tejido diseñado.

ANOVA					
Origen de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	623192.191	1	623192.191	14.303	0.001
Dentro de grupos	958560.997	22	43570.954		
Total	1581753.188	23			

Según el resultado obtenido en el análisis ANOVA de una vía, el p valor obtenido fue 0.001 siendo menor que 0.05, representando un valor que está por debajo del nivel de significancia del 5%. Por lo tanto, **si** existe diferencia significativa entre las medias de las fuerzas de los materiales compuestos reforzados con tejido diseñado y de saco.

Tabla 4 Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de datos obtenidos entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco y materiales compuestos reforzados con tejido diseñado

Pruebas robustas de igualdad de medias				
	Estadístico	gl 1	gl 2	Significación
Welch	14.303	1	14.437	0.002

La prueba robusta de igualdad de medias (ver Tabla 4), nos sirve cuando no es posible asumir que las varianzas poblacionales son iguales. Por lo tanto, en este caso el valor de significación

sigue siendo menor a 0.05, lo que ratifica la diferencia significativa entre la medias de las fuerzas de los materiales compuestos reforzados con tejido diseñado y de saco.

Tabla 5. Análisis ANOVA de una vía para independencia de resultados obtenidos entre los grupos de material compuesto reforzado con tejido diseñado.

ANOVA					
Origen de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	81915.615	3	27305.205	4.327	0.043
Dentro de grupos	50479.246	8	6309.906		
Total	132394.961	11			

Según el resultado obtenido en el análisis ANOVA de una vía, que se presenta en la Tabla 5, el p valor obtenido fue 0.043 siendo menor que 0.05, representado un valor que está por debajo del nivel de significancia del 5%. De acuerdo a estos resultados, **si** existirían diferencias significativas entre las medias de las fuerzas de los grupos de materiales compuestos reforzados con tejido. Pero se realizó la comprobación mediante el análisis de pruebas robustas Welch, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos entre los grupos de materiales compuestos reforzados con tejido diseñado.

Pruebas robustas de igualdad de medias				
	Estadístico	gl 1	gl 2	Significación
Welch	3.753	3	4.436	0.106

En el análisis de pruebas robustas de igualdad de medias dio un nivel de significación de 0.106, lo cual nos permite desestimar el análisis de ANOVA y ratificar la hipótesis de igualdad de resultados, concluyendo así que **no** existe diferencia significativa entre las medias de las fuerzas de los grupos de materiales compuestos reforzados con tejido diseñado y de saco.

Tabla 7. Análisis ANOVA de una vía para independencia de resultados obtenidos entre grupos de materiales compuestos reforzados con tejido de saco.

ANOVA					
Origen de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	597156.529	3	199052.176	6.953	0.013
Dentro de grupos	229009.606	8	28626.201		
Total	826166.135	11			

Al observar el análisis ANOVA de una vía presentando en la Tabla 7, el p valor obtenido fue 0.013, siendo menor que 0.05, representando un valor que está por debajo del nivel de significancia del 5%. Por lo tanto, **si** existe diferencia significativa entre las medias de las fuerzas de los materiales compuestos reforzados con tejido diseñado y de saco.

Tabla 8. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos entre grupos de materiales compuestos reforzados con tejido de saco.

Pruebas robustas de igualdad de medias				
	Estadístico	gl 1	gl 2	Significación
Welch	6.166	3	4.343	0.049

De acuerdo a la prueba robusta de igualdad de medios (ver Tabla 8), el valor de significación sigue siendo menor a 0.05, lo que ratifica la diferencia significativa entre la medias de las fuerzas de grupos de los materiales compuestos reforzados con tejido de saco.

Otro parámetro usado para verificar la eficacia y la adherencia de los materiales compuestos durante el ensayo SLS fue la energía de fractura. En este caso, la energía de fractura fue mayor en el tejido diseñado (ver fig.15). Esto podría deberse a que en el ensayo SLS, el tejido diseñado se rompió sin causar el desprendimiento total del material compuesto. Por otra parte, el tejido de saco mediante la distribución de carga al material compuesto produjo la falla de la interface en el mortero. Esto sucedió debido a la falta de adherencia entre tejido y matriz, sin llegar a la carga de

rotura de tejido, efecto que fue más notorio en las muestras con longitud de pegado de 10 cm. Otro parámetro fundamental que influyó en la variabilidad de la energía de fractura fue el módulo de elasticidad (ver eq. 4). El módulo de elasticidad del material compuesto reforzado con tejido de saco fue mayor al del material compuesto reforzado con tejido diseñado, causando así que la energía de fractura disminuya notablemente. Adicionalmente a esto, durante los ensayos SLS se pudo notar que en los materiales compuestos reforzados con tejido de saco se produjeron un mayor número de grietas que en el ensayo con los materiales compuestos reforzados con tejido diseñado. Al producirse la rotura del tejido diseñado no se alcanzó la carga de adherencia y el número de grietas fue menor, esto influyó en la capacidad de energía durante el ensayo.

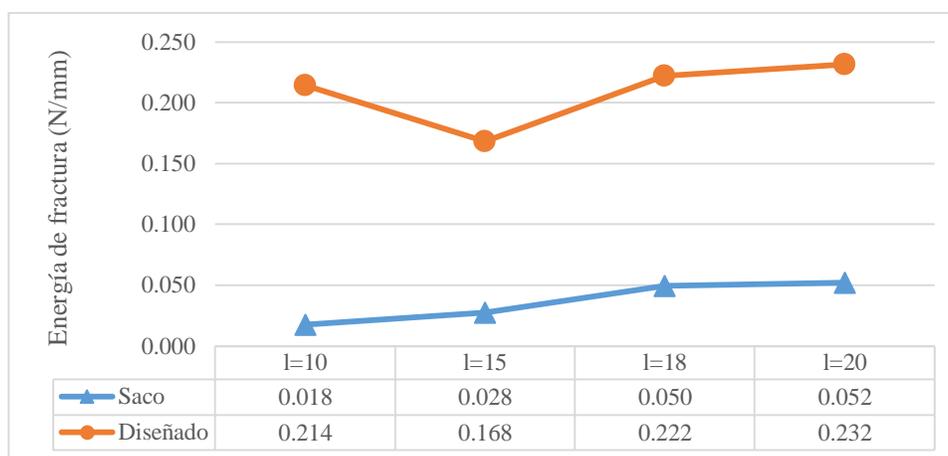


Figura 15. Variación de la energía de fractura entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco y tejido diseñado

5.3 Prueba de pull-off

El ensayo de resistencia al desprendimiento reportó los siguientes tipos de fallas: en las muestras reforzadas con tejido de saco debido a su baja adherencia, se obtuvo un 100% de fallas tipo C, tal como se muestra en la figura 8, mientras que, en los ensayos de muestras FRCM

reforzados con tejido diseñado, el 53.33% presenta fallas tipo D en la matriz cementicia antes de llegar al tejido de refuerzo y el 46.67% de fallas tipo C.

Los resultados obtenidos con las muestras FRCM reforzadas con tejido de saco podrían atribuirse a la poca penetrabilidad del tejido, misma responsable del desprendimiento casi inmediato del primer estrato de mortero sin llegar a niveles de carga elevados. En ocasiones, el tejido se quedó adherido al estrato de mortero inferior, mismo que se quedó adherido al sustrato de mortero desprendido.

En el caso de las muestras FRCM reforzadas con tejido diseñado, se produjeron dos fallas distintas. La falla tipo D se presentó en el primer estrato de matriz cementicia. Esto se puede atribuir a que la adherencia entre el material compuesto y sustrato fue mayor a la resistencia a tracción del mortero. En el caso de las fallas tipo C, a diferencia de las muestras FRCM reforzadas con tejido de saco, se alcanzó niveles de resistencia mucho mayores. Este tipo de falla puede deberse a que el tejido constituye un punto de discontinuidad entre los dos estratos de mortero. Por lo tanto, se pudo evidenciar que un tejido diseñado con aberturas mayores a las de tejido de saco favorece a la adherencia.

En el ensayo de pull-off se utilizaron losas de diferentes resistencias. Este parámetro no influyó en los resultados ni tampoco en el comportamiento de las muestras, debido a que no existe relación aparente en la resistencia de la losa con el tipo de falla que se produjo.

En la Tabla 9 se presentan los resultados del ensayo pull-off en losas de diferentes resistencias con un layer de tejido.

Tabla 9. Resultados de ensayo de pull-off en materiales compuestos reforzados con tejido de saco y tejido diseñado.

Resistencia de la losa	Muestra	Tejido de Saco			Tejido Diseñado		
		Tipo de falla	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Tipo de falla	Carga (N)	Resistencia (MPa)
Alta (41.890 MPa)	1	c	674.172	0.343	d	3745.400	1.908
	2	c	743.264	0.379	c	4645.400	2.366
	3	c	524.356	0.267	d	3745.400	1.908
	4	c	425.448	0.217	d	3545.400	1.806
	5	c	656.172	0.334	c	3645.400	1.857
	Media		604.682	0.308		3865.400	1.969
	Desviación estándar		127.732	0.065		443.847	0.226
	Coficiente de variación (%)	21.124	21.124		11.483	11.483	
Normal (23.662 MPa)	1	c	639.426	0.326	c	3365.400	1.714
	2	c	659.080	0.336	c	3295.400	1.678
	3	c	677.426	0.345	c	3565.400	1.816
	4	c	693.080	0.353	d	3465.400	1.765
	5	c	627.372	0.320	d	3485.400	1.775
	Media		659.277	0.336		3435.400	1.750
	Desviación estándar		26.852	0.014		105.830	0.054
	Coficiente de variación (%)	4.073	4.073		3.081	3.081	
Baja (16,506 MPa)	1	c	659.772	0.336	c	3665.400	1.867
	2	c	641.818	0.327	d	3775.400	1.923
	3	c	645.218	0.329	d	3795.400	1.933
	4	c	597.618	0.304	c	3515.400	1.790
	5	c	618.372	0.315	d	3435.400	1.750
	Media		632.560	0.322		3637.400	1.853
	Desviación estándar		24.539	0.012		158.493	0.081
	Coficiente de variación (%)	3.879	3.879		4.357	4.357	

Al comparar los resultados obtenidos entre las muestras FRCM reforzadas con tejido diseñado y tejido de saco se pudo observar que la variación de esfuerzos es evidente, con resultados hasta 700% mayores en el caso del tejido diseñado (ver fig.16)

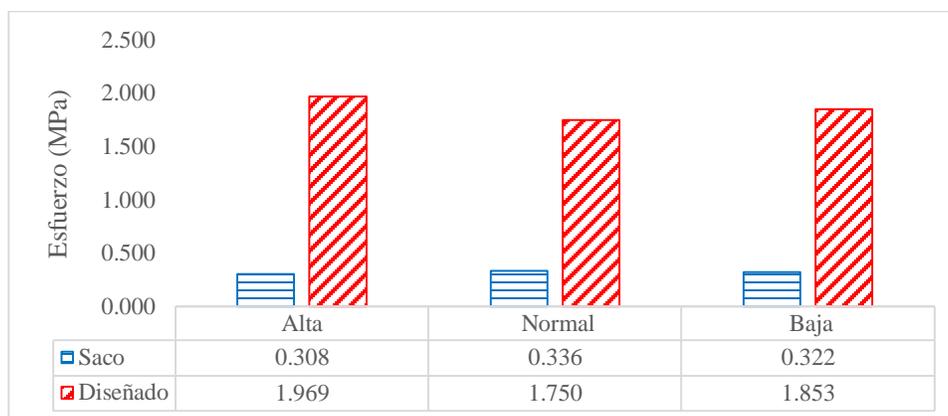


Figura 16. Resultados promedios de esfuerzos máximos en el ensayo pull-off en losas de alta, normal y baja resistencia con muestras reforzados con tejido de saco y diseñado.

Para observar si existen diferencias significativas entre las muestras FRCM reforzadas con tejido de saco y diseñado, se realizó un análisis ANOVA para comprobar estadísticamente la independencia de resultados.

Tabla 10. Análisis ANOVA de una vía para independencia de los resultados obtenidos en la prueba de pull-off entre materiales compuestos reforzados con tejido de diseñado.

ANOVA					
Origen de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	0.120	2	0.060	2.988	0.088
Dentro de grupos	0.242	12	0.020		
Total	0.362	14			

Tabla 11. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos en la prueba pull-off entre materiales compuestos reforzados con tejido diseñado.

Pruebas robustas de igualdad de medias				
	Estadístico	gl 1	gl 2	Significación
Welch	4.076	2	6.966	0.067

Al observar el análisis ANOVA de una vía presentado en la Tabla 10, el p valor obtenido fue 0.088 siendo mayor que 0.05, representado un valor que está por encima del nivel de significancia del 5%. Por lo tanto **no** existe diferencia significativa entre las medias de las fuerzas de los

materiales compuestos reforzados con tejido diseñado. El resultado de la prueba de Welch (ver Tabla 11), confirma el resultado obtenido con el análisis de ANOVA. Se obtuvo una significación de 0.067 siendo mayor a 0.05. Por lo tanto **no** existe diferencia significativa entre las medias de las fuerzas de los materiales compuestos reforzados con tejido diseñado.

Tabla 12. Análisis ANOVA de una vía para independencia de resultados obtenidos en la prueba de pull-off entre materiales compuestos reforzados con tejido de saco.

ANOVA					
Origen de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significación
Entre grupos	0.002	2	0.001	0.644	0.543
Dentro de grupos	0.018	12	0.002		
Total	0.020	14			

Tabla 13. Análisis de pruebas robustas de igualdad de medias para independencia de resultados obtenidos en la prueba pull-off entre grupos de materiales compuestos reforzados con tejido de saco.

Pruebas robustas de igualdad de medias				
	Estadístico	gl 1	gl 2	Significación
Welch	1.500	2	7.95	0.285

El análisis ANOVA de una vía presentado en la Tabla 12, arrojó el p valor de 0.0543, siendo mayor que 0.05, representado un valor que está por encima del nivel de significancia del 5%. Por lo tanto **no** existe diferencia significativa entre las medias de las fuerzas de los materiales compuestos reforzados con tejido de saco. Esto se confirmó una vez más con la prueba robusta de Welch (ver Tabla 14), donde su significación de 0.285 niega que existan diferencias significativas entre las medias de las fuerzas de los materiales compuestos reforzados con tejido de saco.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este artículo describe los resultados de la investigación experimental realizada para mejorar el la adherencia del material compuesto FRCM de cabuya mediante la redistribución de los hilos del tejido de refuerzo. En base a los resultados de este estudio, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

- Los materiales compuestos cementicios reforzados con fibras de cabuya ofrecen elevadas propiedades mecánicas a tracción y flexión.
- Las muestras de tejido diseñado demostraron tener propiedades mecánicas similares a las muestras de tejido de saco.
- Para mejorar la adherencia se diseñaron tejidos con una arquitectura mucho más abierta que los tejidos de saco, que produjo la alteración de propiedades físicas tales como la masa por unidad de área.
- Las muestras de material compuesto reforzadas con tejido diseñado se comportaron mejor que las muestras de material compuesto reforzadas con tejido de saco.
- La capacidad de adherencia de los FRCM reforzados con tejido diseñado fue mayor que la resistencia del tejido, mientras que la adherencia en los FRCM reforzados con tejido de saco, al ser afectada por la baja penetrabilidad del tejido, ocasionó que el debonding ocurra antes de la rotura del tejido.
- La longitud de pegado no influyó en los resultados de los materiales compuestos reforzados con tejido diseñado. Mientras que los problemas de adherencia entre matriz y tejido hicieron que la longitud de pegado en el caso de las muestras reforzadas con tejido de saco sea determinante para alcanzar resultados elevados.

- El módulo de elasticidad de los materiales compuestos, el menor número de grietas producidas durante el ensayo de SLS y la mayor adherencia en los materiales reforzados con tejido diseñado ocasionaron que la energía de fractura sea mucho mayor, que la de los materiales compuestos reforzados con saco.
- En el ensayo de pull-off se manifestaron dos tipos de fallas en las muestras reforzadas con tejido diseñado y solo un tipo de falla en el caso de las muestras reforzadas con tejido de saco. La falla tipo C (en la interface entre tejido y matriz) fue la que se presentó en el mayor número de casos. Las muestras reforzadas con materiales compuestos de tejido diseñado obtuvieron resistencias hasta siete veces mayores a los materiales compuestos reforzados con tejido de saco.
- Las fallas en las muestras reforzadas con tejido diseñado durante el ensayo pull-off se debieron a que la resistencia a tracción del mortero fue menor a la adherencia entre matriz-sustrato. También en algunos casos, el tejido diseñado fue un punto de discontinuidad entre los estratos de mortero. Lo que produjo la falla tipo C
- La resistencia del sustrato de hormigón no produjo ningún efecto al momento del ensayo de pull-off, así mismo no tuvo influencia en el tipo de fallas que se presentaron en las probetas ensayadas.
- El tejido diseñado favoreció la adherencia en los materiales FRCM gracias a su arquitectura abierta y mayor capacidad de penetrabilidad.
- Los materiales compuestos FRCM reforzados con tejido de cabuya diseñada requieren investigaciones teóricas futuras.

7 BIBLIOGRAFIA

- Almache, J., & Tapia, D. (2016). Estudio de la adherencia de un sistema compuesto FRCC sostenible para el reforzamiento de elementos de hormigón armado (Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Ascione, L., de Felice, G., & De Santis, S. (2014). A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) strengthening systems. *Elsevier*, 1-10.
- Barros Fierro, V. P., & Ramírez Cueva, H. C. (2012). Diseño de hormigones con fibras de polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 Mpa con agregado de la cantera de Pifo . (Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad Central del Ecuador. Quito
- Carozzi, F. G., Colombi, P., Fava, G., & Poggi, C. (2016). A cohesive interface crack model for the matrix-textile debonding in FRCC composites. *Elsevier*, 1-12.
- Cevallos , O., Olivito, R., & Codispoti, R. (2015). Experimental Analysis of Repaired Masonry Elements with Flax-FRCC and PBO-FRCC Composites Subjected to Axial Bending Loads. *Fibers*, 1-13.
- Cevallos, O. A. (2015). Sustainable Fabric-Reinforced Cementitious Composites for the strengthening of masonry elements (Trabajo de grado previo a la obtención del Título de PhD en Estructuras). Universidad de Calabria, Calabria, Italia.
- Cevallos, O., & Olivito, R. (2014). Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable. *Composites*, 1-11.

- Estrella, A. (2016). Estudio de un material compuesto a base de fibras naturales de cabuya para mejorar a las propiedades mecánicas de elementos de concreto reforzado. (Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Gassan, J. (2001). A study of fibre an interface parametres affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. *Composites*, 1-6.
- Hartig, J., Ulrich, H., & Schicktanz, K. (2008). Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete. *ScienceDirect*, 1-9.
- ASTM. ASTM C78/C78M-02: Historical Standard: Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto (Utilizando Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro) (2002). West Condhocken, PA.
- ASTM. ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete (2013). West Conshohocken, PA.
- ASTM. ASTM D792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement (2013). West Consshocken, PA.
- ASTM. ASTM D3039/D3039M-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2014). West Conshohocken, PA.
- ASTM. ASTM D5868-01: Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding (2014). West Conshohocken, PA.
- ASTM. ASTM D3776/D3776-09a: Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric (2017). West Conshohocken, PA.

- ASTM. ASTM D4541: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers (2017). West Conshohocken, PA.
- CNR. (2013). CNR-DT 200: “CNR–Advisory Committee on Technical Recommendations for construction.”
- D’Antino, T., Carloni, C., Sneed, L. H., & Pellegrino, C. (2014). Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach. *Engineering Fracture Mechanics*, *117*, 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.01.011>
- ISO. ISO 4606: Textile glass -- Woven fabric -- Determination of tensile breaking force and elongation at break by the strip method (1995). Geneva, Switzerland.
- ISO. ISO 1889: Reinforcement yarns — Determination of linear density (2009). Geneva, Switzerland.
- ISO. ISO 2062: Textiles -- Yarns from packages -- Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester (2009). Geneva, Switzerland.
- M. Santiago Poveda. (2000). Lecturas complementarias - Materiales compuestos. *Materiales Compuestos*, 123–139, Vol 1. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.46908>
- Menna, C., Asprone, D., Durante, M., Zinno, A., Balsamo, A., & Prota, A. (2015). Structural behaviour of masonry panels strengthened with an innovative hemp fibre composite grid. *Construction and Building Materials*, *100*, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.051>
- Oliveira, D. V., Ghiassi, B., & Lourenço, P. B. (2014). Bond behaviour and durability of FRP

composites applied externally to masonry structures. *9th International Masonry Conference*, (November 2015), 1–21.

Ruredil. (2017). Mesh, XC. Retrieved from

http://english.ruredil.it/Ruredil_Prodotti_chimici_per_edilizia/cataloghi.asp

Sika. (2017). Concrete SikaFiber ® Technology FIBERS IMPROVE YOUR CONCRETE AND YOUR STRUCTURE Fiber reinforcement. Retrieved from

https://www.sika.com/en/solutions_products/construction-markets/sika-tunneling-mining/mining-solutions/fibers.html

Tamayo, N. A. (2012). *Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación*.

Martínez , M. F. (2016). Guía para el diseño de refuerzos de elementos estructurales de hormigón armado mediante material compuesto por mallas de fibras minerales embebidas en matriz cementicia (FRCM) (Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

Nanni, A. (1993). Flexural behavior and desing of RC members using FRP reinforcement. *Journal of structural engineering*, 11-15.

Nanni, A. (1995). Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement. *Concrete International*, 5-6.

Ombres, L. (2014). Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete. *Elsevier*, 1-9.

- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: a review . *Elsevier*, 1-7.
- Rao, M., Rao, M., & Prasad, R. (2009). Fabrication and testing of natural fibre composites: Vakka, sisal, bamboo and banana. *Materials & Design*, 1-6.
- Sandoval , P. (2014). Evaluación experimental del comportamiento mecánico de refuerzos de fibra de carbono con matriz cementícea (FRCM), influencia del tipo de matriz. (Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Trapko, T. (2014). Confined concrete elements with PBO-FRCM composites. *Elsevier*, 1-7.

8 ANEXOS

8.1 Dosificaciones de mortero y hormigón

DOSIFICACIONES DE MORTERO Y HORMIGÓN				
Elemento	Cemento	Agregado fino	Agregado Grueso	Agua
Mortero (45.646 MPa)	1	1.1	-	0.47
Vigas (28.161 MPa)	1	1.3	2.3	0.55
Losa alta resistencia (41.890 MPa)	1	1	2	0.49
Losa normal resistencia (23.662 MPa)	1	1.7	2.7	0.54
Losa baja resistencia (16.506 MPa)	1	2.2	3.2	0.67

8.2 Caracterización física del tejido de rollo longitudinal y transversal

- Densidad específica

DENSIDAD ESPECIFICA DE HILOS DE ROLLO					
Muestra	Masa de muestra seca al aire [g]	Masa de estructura [g]	Masa de estructura+ canastilla [g]	Masa estructura +canastilla+ muestra sumergida [g]	Densidad [g/cm ³]
1	1.18	212.54	229.69	230.03	1.4
2	1.13	212.54	229.69	230.05	1.47
3	1.16	212.54	229.7	230.05	1.43
4	1.08	212.54	229.69	230.04	1.48
5	1.09	212.54	229.7	230.02	1.42
6	1.01	212.54	229.71	230.02	1.44
7	1.12	212.54	229.69	230.03	1.44
8	0.97	212.54	229.69	229.99	1.45
9	1.12	212.54	229.69	230.04	1.45
10	1.14	212.54	229.69	230.04	1.44
11	1.07	212.54	229.69	230.01	1.43
12	1.27	212.54	229.69	230.08	1.44
			Media [g/cm ³]	1.44	
			Desviación estándar [g/cm ³]	0.02	
			Coefficiente de variación [%]	1.39	

Fórmulas utilizadas

$$Densidad = \frac{A}{A + W - B}$$

Donde:

A: masa de muestra al aire seca

W: masa canastilla sumergida

B: masa muestra sumergida + canastilla

- **Masa por unidad de área**

MASA POR UNIDAD DE AREA DE TEJIDO DE ROLLO		
Medidas de la muestra [m]	0.10 x 0.10	
Área [m2]:	0.01	
Muestra	Peso [g]	Peso/Área [g/m2]
1	2.92	292
2	2.86	286
3	2.69	269
4	2.81	281
5	2.77	277
6	2.86	286
7	3.06	306
8	2.77	277
9	3.04	304
10	2.93	293
Media [g/m2]	287.1	
Desviación estándar [g/m2]	11.89	
Coefficiente de variación [%]	4.14	

Fórmulas utilizadas

$$\text{Masa por unidad de área} = \frac{P}{A}$$

Donde:

P: peso de la muestra

A: área de la muestra

- **Densidad lineal (TEX) de tejido de rollo longitudinal**

DENSIDAD LINEAL (TEX) DE TEJIDO DE ROLLO LONGITUDINAL		
Longitud de la muestra [m]	2	
Longitud de la muestra [km]	0.002	
Muestra	Peso [gr]	Densidad [g/km]=[Tex]
1	1.22	610
2	1.17	585
3	1.38	690
4	1.53	765
5	1.33	665
6	1.65	825
7	1.3	650
8	1.34	670
9	1.48	740
10	1.19	595
Media [Tex]	679.5	
Desviación Estándar [Tex]	77.69	
Coefficiente Variación [%]	11.43	

Fórmulas utilizadas

$$TEX = \frac{P * 1000}{L * 1000000}$$

Donde:

P: peso de la muestra

L: longitud de la muestra

- **Densidad lineal (TEX) de tejido de rollo transversal**

DENSIDAD LINEAL ROLLO TRANSVERSAL		
Longitud de la muestra [m]		1.5
Longitud de la muestra [km]		0.0015
Muestra	Peso [gr]	Densidad [g/km]=[Tex]
1	1.33	886.67
2	1.21	806.67
3	1.25	833.33
4	1.33	886.67
5	1.22	813.33
6	1.3	866.67
7	1.26	840.00
8	1.28	853.33
9	1.2	800.00
10	1.32	880.00
Media [Tex]		846.67
Desviación estándar [Tex]		33.11
Coeficiente variación [%]		3.91

Fórmulas utilizadas

$$TEX = \frac{P * 1000}{L * 1000000}$$

Donde:

P: peso de la muestra

L: longitud de la muestra

8.3 Caracterización física del tejido de saco longitudinal y transversal - Densidad específica

DENSIDAD ESPECIFICA DE HILOS DE SACO					
Muestra	Masa de muestra seca al aire [g]	Masa de estructura [g]	Masa de estructura+ canastilla [g]	Masa estructura +canastilla+muestra sumergida [g]	Densidad [g/cm ³]
1	1.74	212.54	229.68	230.19	1.41
2	1.45	212.54	229.69	230.13	1.44
3	1.27	212.54	229.7	230.08	1.43
4	1.18	212.54	229.7	230.06	1.44
5	1.24	212.54	229.7	230.07	1.43
6	1.38	212.54	229.7	230.1	1.41
7	1.35	212.54	229.69	230.1	1.44
8	1.44	212.54	229.7	230.13	1.43
9	1.32	212.54	229.69	230.07	1.4
10	1.09	212.54	229.69	230.03	1.45
11	1.71	212.54	229.7	230.24	1.46
12	1.04	212.54	229.7	230.02	1.44
		Media [g/cm ³]			1.43
		Desviación estándar [g/cm ³]			0.02
		Coefficiente de variación [%]			1.40

Fórmulas utilizadas

$$Densidad = \frac{A}{A + W - B}$$

Donde:

A: masa de muestra al aire seca

W: masa canastilla sumergida

B: masa muestra sumergida + canastilla

- **Masa por unidad de área**

MASA POR UNIDAD DE AREA		
Medidas de la muestra [m]	0.10 x 0.10	
Área [m2]:	0.01	
Muestra	Peso [g]	Peso/Área [g/m2]
1	3.92	392
2	4.04	404
3	4.13	413
4	4.13	413
5	3.87	387
6	3.96	396
7	3.98	398
8	4.04	404
9	3.93	393
10	4.05	405
Media [g/m2]	400.5	
Desviación estándar [g/m2]	8.78	
Coeficiente de variación [%]	2.19	

Fórmulas utilizadas

$$Masa\ por\ unidad\ de\ área = \frac{P}{A}$$

Donde:

P: peso de la muestra

A: área de la muestra

- **Densidad lineal (TEX) de tejido de saco longitudinal**

DENSIDAD LINEAL DE SACO LONGITUDINAL		
Longitud de la muestra [m]	1.5	
Longitud de la muestra [km]	0.0015	
Muestra	Peso [gr]	Densidad [g/km]=[Tex]
1	1.12	746.67
2	1.16	773.33
3	1.23	820.00
4	1.12	746.67
5	1.15	766.67
6	1.12	746.67
7	1.2	800.00
8	1.12	746.67
9	1.17	780.00
10	1.21	806.67
Media [Tex]	773.333333	
Desviación estándar [Tex]	27.76	
Coeficiente variación [%]	3.59	

Fórmulas utilizadas

$$TEX = \frac{P * 1000}{L * 1000000}$$

Donde:

P: peso de la muestra

L: longitud de la muestra

- **Densidad lineal (TEX) de tejido de saco transversal**

DENSIDAD LINEAL SACO TRANSVERSAL		
Longitud de la muestra [m]		0.7
Longitud de la muestra [km]		0.0007
Muestra	Peso [gr]	Densidad [g/km]=[Tex]
1	0.67	957.14
2	0.51	728.57
3	0.47	671.43
4	0.51	728.57
5	0.57	814.29
6	0.58	828.57
7	0.61	871.43
8	0.62	885.71
9	0.52	742.86
10	0.69	985.71
Media [Tex]		821.43
Desviación estándar [Tex]		104.38
Coeficiente variación [%]		12.71

Fórmulas utilizadas

$$TEX = \frac{P * 1000}{L * 1000000}$$

Donde:

P: peso de la muestra

L: longitud de la muestra

8.4 Caracterización física del tejido diseñado longitudinal y transversal

- Densidad específica

DENSIDAD ESPECIFICA DE HILOS DE TEJIDO DISEÑADO					
Muestra	Masa de muestra seca al aire [g]	Masa de estructura [g]	Masa de estructura+ canastilla [g]	Masa estructura +canastilla+muestra sumergida [g]	Densidad [g/cm ³]
1	1.54	212.54	229.68	230.18	1.48
2	1.56	212.54	229.69	230.19	1.47
3	1.34	212.54	229.7	230.11	1.44
4	1.26	212.54	229.7	230.08	1.43
5	1.65	212.54	229.7	230.2	1.43
6	1.53	212.54	229.7	230.17	1.44
7	1.44	212.54	229.69	230.17	1.5
8	1.33	212.54	229.7	230.17	1.55
9	1.34	212.54	229.69	230.17	1.56
10	1.36	212.54	229.69	230.17	1.55
11	1.67	212.54	229.7	230.17	1.39
12	1.71	212.54	229.7	230.17	1.38
Media [g/cm ³]					1.47
Desviación estándar [g/cm ³]					0.06
Coeficiente de variación [%]					4.08

Fórmulas utilizadas

$$Densidad = \frac{A}{A + W - B}$$

Donde:

A: masa de muestra al aire seca

W: masa canastilla sumergida

B: masa muestra sumergida + canastilla

- **Masa por unidad de área**

MASA POR UNIDAD DE AREA		
Medidas de la muestra [m]	0.10 x 0.10	
Área [m2]:	0.01	
Muestra	Peso [g]	Peso/Área [g/m2]
1	2.69	269
2	2.77	277
3	2.82	282
4	2.68	268
5	2.76	276
6	2.84	284
7	2.83	283
8	2.78	278
9	2.7	270
10	2.97	297
Media [g/m2]	278.4	
Desviación estándar [g/m2]	8.73	
Coefficiente de variación [%]	3.14	

Fórmulas utilizadas

$$\text{Masa por unidad de área} = \frac{P}{A}$$

Donde:

P: peso de la muestra

A: área de la muestra

- **Densidad lineal (TEX) de tejido de diseño longitudinal**

DENSIDAD LINEAL DISEÑO LONGITUDINAL		
Longitud de la muestra [m]		1.5
Longitud de la muestra [km]		0.0015
Muestra	Peso [gr]	Densidad [g/km]=[Tex]
1	1.11	740.00
2	1.22	813.33
3	1.24	826.67
4	1.19	793.33
5	1.16	773.33
6	1.15	766.67
7	1.14	760.00
8	1.17	780.00
9	1.18	786.67
10	1.12	746.67
Media [Tex]		778.67
Desviación estándar [Tex]		27.54
Coeficiente variación [%]		3.54

Fórmulas utilizadas

$$TEX = \frac{P * 1000}{L * 1000000}$$

Donde:

P: peso de la muestra

L: longitud de la muestra

- **Densidad lineal (TEX) de tejido de diseñado transversal**

DENSIDAD LINEAL DISEÑADO TRANSVERSAL		
Longitud de la muestra [m]		0.7
Longitud de la muestra [km]		0.0007
Muestra	Peso [gr]	Densidad [g/km]=[Tex]
1	0.49	700.00
2	0.57	814.29
3	0.56	800.00
4	0.59	842.86
5	0.6	857.14
6	0.55	785.71
7	0.62	885.71
8	0.59	842.86
9	0.49	700.00
10	0.71	1014.29
Media [Tex]		824.29
Desviación estándar [Tex]		91.11
Coeficiente variación [%]		11.05

Fórmulas utilizadas

$$TEX = \frac{P * 1000}{L * 1000000}$$

Donde:

P: peso de la muestra

L: longitud de la muestra

8.5 Resumen de tracción en hilos

- Tracción de hilos longitudinales de rollo

RESISTENCIA A LA TRACCION HILOS LONGITUDINALES ROLLO				
Muestra	Carga Máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)
1	184.160	11.124	390.170	0.057
2	162.060	7.870	343.350	0.040
3	217.310	8.319	460.400	0.042
4	128.910	12.670	273.120	0.063
5	151.010	5.908	319.940	0.029
6	209.940	8.180	444.800	0.039
7	169.430	7.487	358.960	0.037
8	195.210	9.311	413.580	0.045
9	165.740	6.751	351.150	0.035
10	220.990	8.767	468.210	0.041
Media	180.476	8.639	382.368	0.043
Desviación estándar	33.698	2.698	71.391	0.014
Coefficiente de variación (%)	18.672	31.235	18.671	32.099

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\sigma) = \frac{C_{max}}{A}$$

$$\text{área } (A) = \frac{Tex * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{(60 \% \sigma - 20 \% \sigma)}{(60 \% \epsilon_i - 20 \% \epsilon_i)}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

L_o : Longitud calibrada del espécimen

- **Tracción de hilos transversales de rollo**

RESISTENCIA A LA TRACCION HILOS TRANSVERSALES ROLLO				
Muestra	Carga Máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)
1	139.955	8.724	238.030	0.044
2	147.321	9.492	250.560	0.046
3	169.420	11.209	288.140	0.056
4	191.500	8.138	325.73	0.041
5	128.906	10.398	219.240	0.052
6	114.174	10.772	194.180	0.052
7	176.786	5.279	300.67	0.027
8	158.370	11.348	269.350	0.056
9	132.589	9.481	225.5	0.048
10	81.027	6.943	281.88	0.034
Media	144.005	9.427	259.328	0.046
Desviación estándar	25.028	1.239	39.618	0.006
Coeficiente de variación (%)	17.380	13.147	15.277	13.464

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\sigma) = \frac{C_{max}}{A}$$

$$\text{área } (A) = \frac{Tex * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{(60 \% \sigma - 20 \% \sigma)}{(60 \% \epsilon_i - 20 \% \epsilon_i)}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

L_o : Longitud calibrada del espécimen

- **Tracción de hilos longitudinales de saco**

RESISTENCIA A LA TRACCION HILOS LONGITUDINALES SACO				
Muestra	Carga Máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)
1	151.004	8.052	279.120	0.042
2	151.004	9.652	279.120	0.048
3	162.050	8.010	299.540	0.040
4	139.960	8.201	258.700	0.039
5	195.200	10.356	360.820	0.053
6	158.370	8.297	292.740	0.042
7	125.220	8.713	231.470	0.043
8	143.640	8.383	265.510	0.042
9	173.100	9.641	319.970	0.048
10	154.690	9.161	285.930	0.047
Media	155.424	8.847	287.292	0.044
Desviación estándar	21.252	1.081	39.287	0.006
Coefficiente de variación (%)	13.674	12.220	13.675	13.381

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\sigma) = \frac{C_{max}}{A}$$

$$\text{área } (A) = \frac{Tex * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{(60 \% \sigma - 20 \% \sigma)}{(60 \% \epsilon_i - 20 \% \epsilon_i)}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

L_o : Longitud calibrada del espécimen

- Tracción de hilos transversales de tejido de saco

RESISTENCIA A LA TRACCION HILOS TRANSVERSALES SACO				
Muestra	Carga Máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)
1	195.210	10.207	340.090	0.050
2	220.990	10.934	385.010	0.055
3	151.012	9.055	263.081	0.045
4	136.279	8.841	237.420	0.043
5	136.280	10.367	237.420	0.049
6	191.530	8.127	333.670	0.042
7	209.940	9.353	365.760	0.046
8	169.430	9.375	295.170	0.046
9	154.700	8.852	269.500	0.043
10	176.790	8.148	272.410	0.042
Media	174.216	9.326	299.953	0.046
Desviación estándar	38.240	0.897	66.626	0.005
Coefficiente de variación (%)	21.950	9.613	22.212	10.467

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\delta) = \frac{C_{max}}{A}$$

$$\text{área } (A) = \frac{\text{Tex} * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{(60\% \sigma - 20\% \sigma)}{(60\% \epsilon_i - 20\% \epsilon_i)}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

L_o : Longitud calibrada del espécimen

- **Tracción de hilos longitudinales de tejido diseñado**

RESISTENCIA A LA TRACCION HILOS LONGITUDINALES DISEÑADO				
Muestra	Carga Máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)
1	158.380	8.468	298.830	0.042
2	162.060	8.959	305.780	0.045
3	165.740	7.700	312.730	0.040
4	158.380	9.161	298.830	0.046
5	198.890	9.513	375.270	0.045
6	125.230	9.993	236.280	0.050
7	158.380	8.745	298.830	0.044
8	173.110	8.404	326.620	0.043
9	117.860	7.881	222.380	0.040
10	139.960	6.186	264.080	0.032
Media	155.799	8.501	293.963	0.043
Desviación estándar	17.156	0.703	32.371	0.002
Coefficiente de variación (%)	11.012	8.268	11.012	5.838

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\sigma) = \frac{C_{max}}{A}$$

$$\text{área } (A) = \frac{Tex * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{(60 \% \sigma - 20 \% \sigma)}{(60 \% \epsilon_i - 20 \% \epsilon_i)}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

L_o : Longitud calibrada del espécimen

- Tracción de hilos transversales de tejido diseñado

RESISTENCIA A LA TRACCION HILOS TRANSVERSALES DISEÑADO				
Muestra	Carga Máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)
1	154.695	8.852	275.750	0.043
2	154.695	10.143	275.749	0.049
3	169.430	9.473	302.010	0.050
4	136.280	10.367	242.920	0.049
5	169.430	9.375	302.010	0.046
6	228.360	10.460	407.060	0.051
7	158.380	9.183	282.310	0.045
8	162.060	8.862	288.880	0.044
9	165.740	11.171	295.450	0.055
10	209.940	9.353	374.230	0.046
Media	170.901	9.724	304.637	0.048
Desviación estándar	13.683	0.612	24.390	0.003
Coefficiente de variación (%)	8.006	6.299	8.006	6.143

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\sigma) = \frac{C_{max}}{A}$$

$$\text{área } (A) = \frac{Tex * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{(60 \% \sigma - 20 \% \sigma)}{(60 \% \epsilon_i - 20 \% \epsilon_i)}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

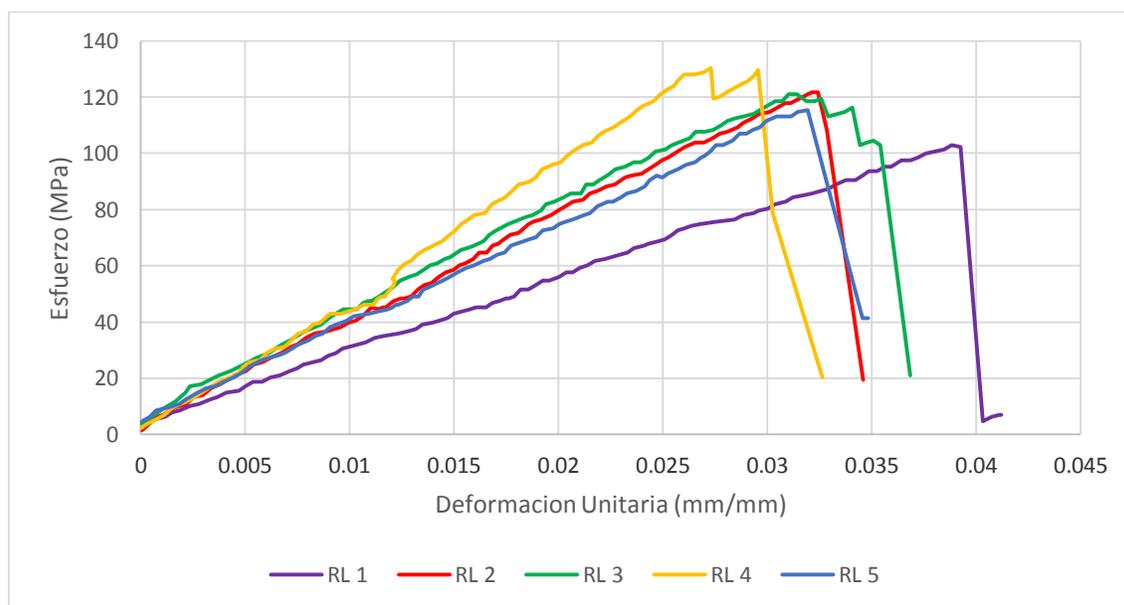
L_o : Longitud calibrada del espécimen

8.6 Resumen de tracción en tejidos

- Tracción tejidos longitudinales de rollo

RESISTENCIA A LA TRACCION TEJIDO LONGITUDINAL ROLLO					
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Módulo
1	486.180	8.244	103.010	0.041	2694.748
2	574.580	6.815	121.730	0.035	3867.168
3	570.900	7.370	120.950	0.037	3868.376
4	615.100	6.463	130.320	0.033	4994.200
5	545.120	6.932	115.490	0.035	3433.520
Media	558.376	7.165	118.300	0.036	3771.60248
Desviación estándar	47.500	0.685	10.062	0.003	834.739109
Coefficiente de variación (%)	8.507	9.558	8.505	9.082	22.1322134

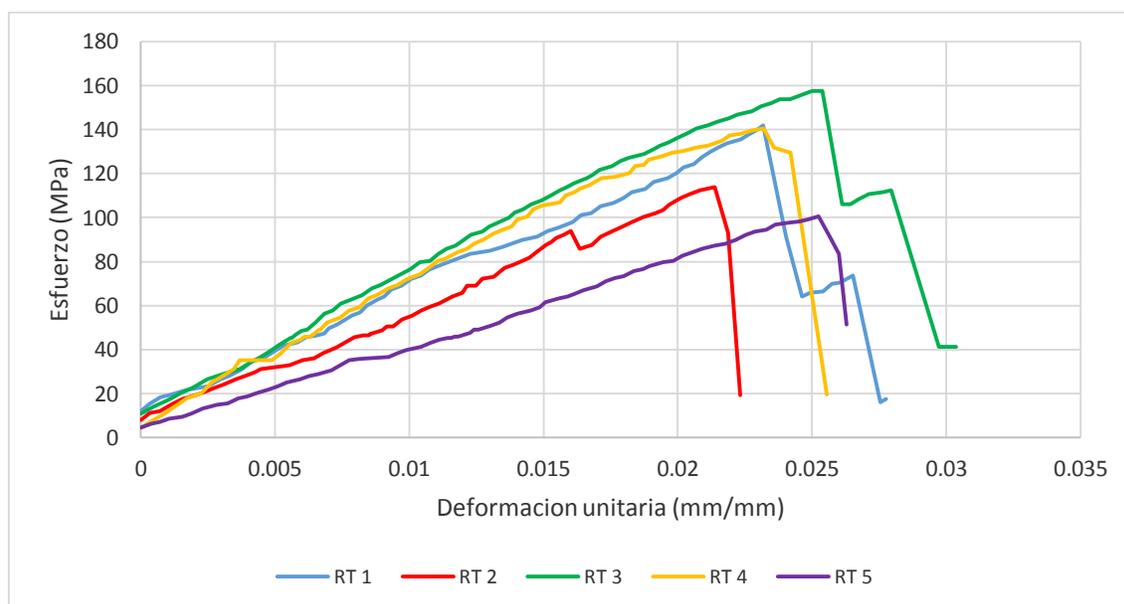
Nota: Las fórmulas son iguales a las utilizadas en la tracción de hilos.



- Tracción de tejidos transversales de rollo

RESISTENCIA A LA TRACCION TEJIDO TRANSVERSAL DE ROLLO					
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Módulo
1	651.900	5.578	142.000	0.028	4973.000
2	523.000	4.309	113.900	0.022	4723.333
3	744.000	6.154	157.600	0.030	7193.333
4	663.000	4.959	140.500	0.026	7357.143
5	475.100	5.098	100.700	0.026	2690.000
Media	611.400	5.220	130.940	0.026	5387.362
Desviación Estándar	109.861	0.692	23.072	0.003	1938.425
Coeficiente de variación (%)	17.969	13.251	17.620	11.237	35.981

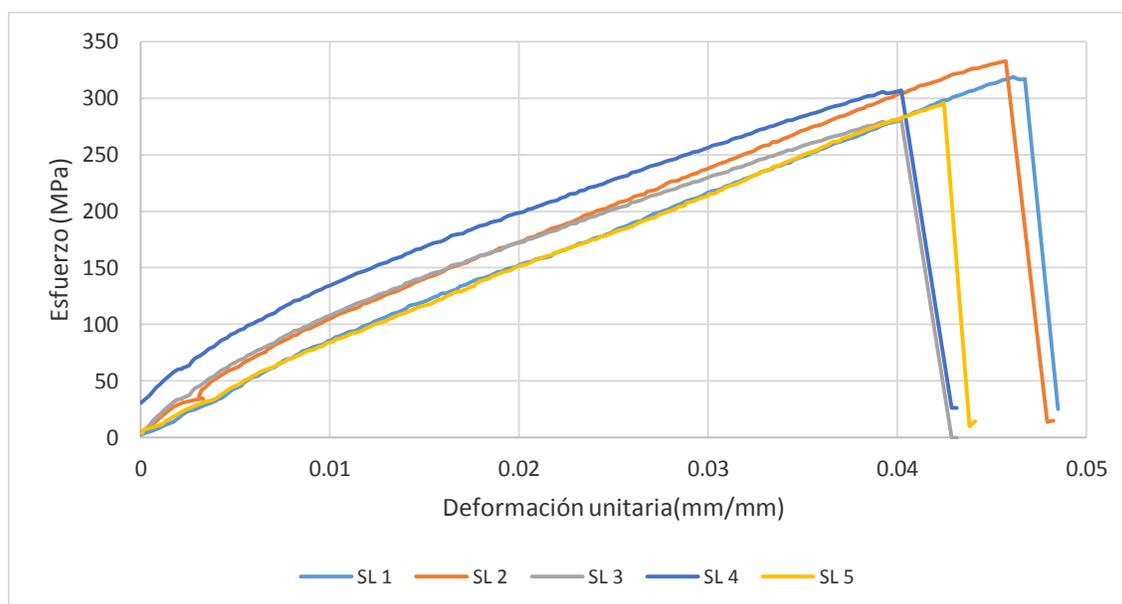
Nota: Las fórmulas son iguales a las utilizadas en la tracción de hilos.



- Tracción de tejidos longitudinales de sacos

RESISTENCIA A LA TRACCION TEJIDO LONGITUDINAL SACO					
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Módulo
1	2066.280	14.665	318.405	0.048	6478.167
2	2158.335	14.089	332.594	0.048	6810.894
3	1819.509	12.723	280.378	0.043	6742.121
4	1990.770	13.777	306.770	0.046	6629.382
5	1918.956	13.630	295.703	0.044	6486.342
Media	1990.770	13.777	306.770	0.046	6629.382
Desviación Estándar	130.640	0.710	20.132	0.002	172.224
Coefficiente de variación (%)	6.562	5.156	6.563	5.018	2.598

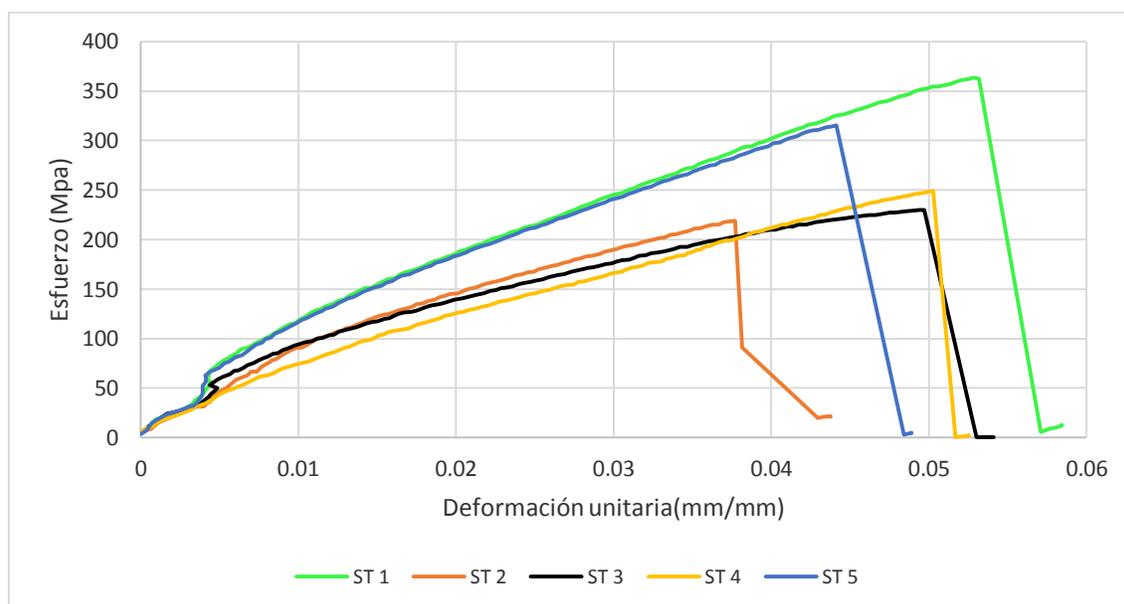
Nota: Las fórmulas son iguales a las utilizadas en la tracción de hilos



- Tracción de tejidos transversales de saco

RESISTENCIA A LA TRACCION TEJIDO TRANSVERSAL DE SACO					
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Módulo
1	2508.300	11.507	363.880	0.058	6503.619
2	1510.100	8.447	219.080	0.044	5945.633
3	1583.800	10.825	229.760	0.054	4395.714
4	1716.400	10.505	249.000	0.053	4606.354
5	2173.100	9.726	315.260	0.049	6861.639
Media	1898.340	10.202	275.396	0.052	5662.592
Desviación Estándar	427.292	1.171	61.987	0.006	1111.954
Coefficiente de variación (%)	22.509	11.483	22.508	10.689	19.6368

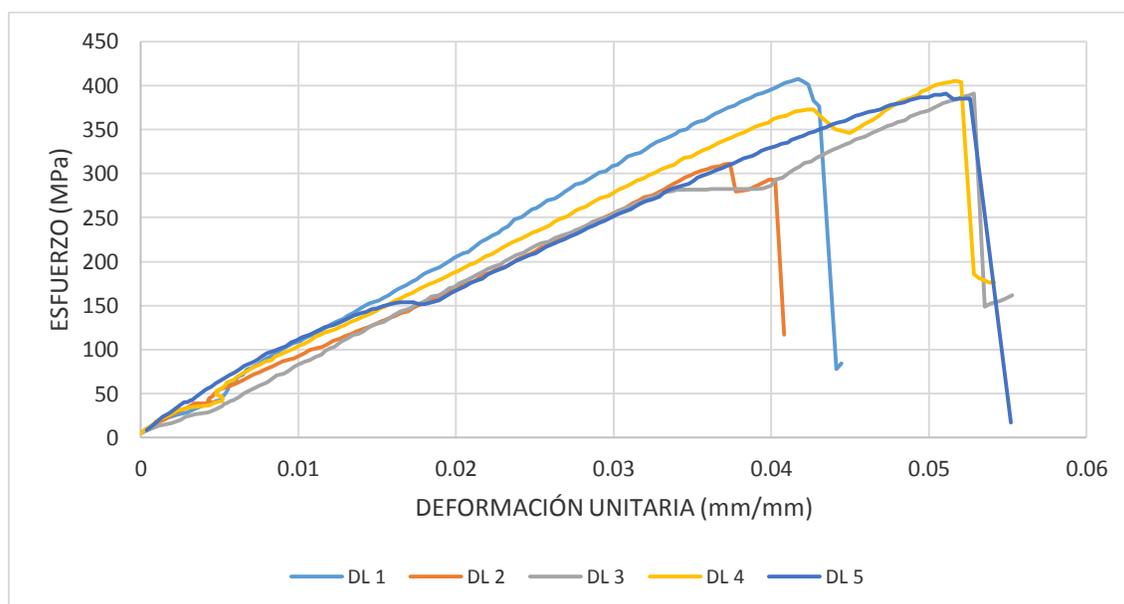
Nota: Las fórmulas son iguales a las utilizadas en la tracción de hilos



- **Tracción de tejido longitudinal diseñado**

RESISTENCIA A LA TRACCION TEJIDO LONGITUDINAL DISEÑADO					
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Módulo
1	2224.700	8.799	349.790	0.044	8542.783
2	1661.100	8.159	261.180	0.041	6739.098
3	2088.400	10.942	328.362	0.055	7178.953
4	2165.700	10.665	340.524	0.054	7398.344
5	2088.400	10.932	328.362	0.055	6117.488
Media	2045.660	9.899	321.644	0.050	7195.333
Desviación Estándar	222.489	1.321	34.981	0.007	898.193
Coefficiente de variación (%)	10.876	13.343	10.876	13.720	12.483

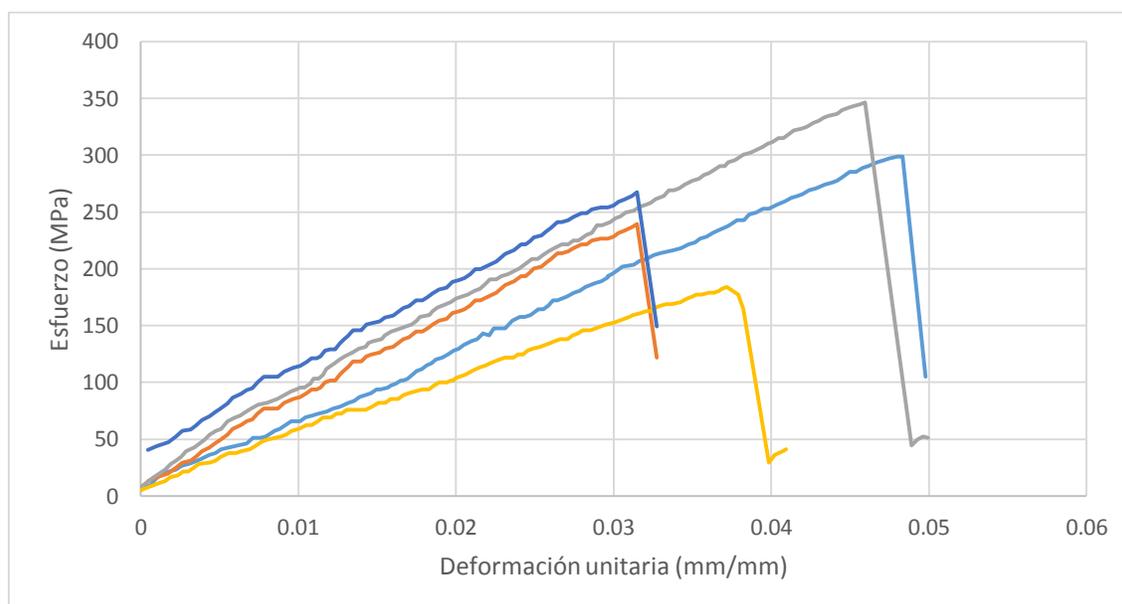
Nota: Las fórmulas son iguales a las utilizadas en la tracción de hilos



- **Tracción de tejido transversal diseñado**

RESISTENCIA A LA TRACCION TEJIDO TRANSVERSAL DISEÑADO					
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Módulo
1	670.350	11.582	298.730	0.060	6327.151
2	537.750	7.114	239.640	0.037	7059.785
3	777.160	9.588	346.330	0.050	6968.772
4	412.520	8.191	183.830	0.041	4904.085
5	599.445	9.119	267.133	0.047	6314.948
Media	599.445	9.119	267.133	0.047	6314.948
Desviación Estándar	158.490	1.929	70.630	0.010	995.481
Coeficiente de variación (%)	26.439	21.158	26.440	21.690	15.764

Nota: Las fórmulas son iguales a las utilizadas en la tracción de hilos



8.7 Caracterización física del material compuesto

- Densidad del material compuesto

DENSIDAD MATERIAL COMPUESTO				
Muestra	Primera Lectura (g)	Segunda lectura (g)	Masa Seca (g)	Densidad (g/cm ³)
1	4278	4459	331	1.829
2	4278	4463	331	1.789
3	4278	4461	328	1.792
4	4278	4465	325	1.738
5	4278	4462	336	1.826
6	4278	4464	324	1.742
Media				1.786
Desviación estándar				0.039
Variación %				2.202

Fórmulas utilizadas

$$densidad = \frac{Masa\ seca}{(primera\ lectura - segunda\ lectura)}$$

- **Absorción del material compuesta**

ABSORCION MATERIAL COMPUESTO			
Muestra	Masa estado SSS (g)	Masa Seca (g)	Absorción (%)
1	377	331	13.897
2	377	331	13.897
3	376	328	14.634
4	372	325	14.462
5	383	336	13.988
6	371	324	14.506
	Media		14.231
	Desviación estándar		0.339
	Variación %		2.379

Fórmulas utilizadas

$$absorción (\%) = \frac{Masa\ estado\ SSS - Masa\ seca}{Masa\ seca} * 100$$

8.8 Propiedades mecánicas de material compuesto

- Tracción de material compuesto

TRACCIÓN DE MATERIAL COMPUESTO					
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
1	5329.616	10.825	12.113	0.073	185.514
2	5561.658	15.016	12.640	0.102	171.973
3	4618.755	10.537	10.497	0.070	154.837
4	5720.037	8.852	13.000	0.058	180.764
5	5804.751	9.321	13.193	0.062	172.263
6	4651.904	8.361	10.573	0.054	142.431
Media	5281.120	10.485	12.003	0.070	167.963
Desviación estándar	525.839	2.416	1.195	0.017	16.314
Coefficiente de variación (%)	9.957	23.040	9.957	24.753	9.713

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\sigma) = \frac{C_{max}}{A}$$

$$\text{área } (A) = \frac{Tex * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{(60 \% \sigma - 20 \% \sigma)}{(60 \% \epsilon_i - 20 \% \epsilon_i)}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

L_o : Longitud calibrada del espécimen

- Flexión de materiales compuestos

FLEXIÓN DE MATERIAL COMPUESTO						
Muestra	Carga máxima (N)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria máxima (mm/mm)	Deflexión máxima (mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
1	478.818	13.289	24.183	1.477	16.850	680.238
2	500.918	21.032	25.299	2.337	17.629	401.166
3	553.490	19.592	27.954	2.177	19.479	713.537
4	578.270	19.645	29.205	2.183	20.351	695.189
5	575.590	15.560	29.070	1.729	20.257	675.006
6	515.650	17.395	26.043	1.933	18.147	422.633
Media	533.789	17.752	26.959	1.973	18.786	597.961
Desviación estándar	41.341	2.918	2.088	0.324	1.455	144.903
Coefficiente de variación (%)	7.745	16.438	7.744	16.440	7.747	24.233

Fórmulas utilizadas

$$\text{esfuerzo máximo } (\sigma) = \frac{C_{max} * L}{b_v * d^2}$$

$$\text{área } (A) = \frac{Tex * \text{número de hilos}}{\delta * 1000}$$

$$\text{deformación unitaria } (\epsilon_i) = \frac{\epsilon_i}{L_o}$$

$$\text{Módulo de elasticidad } (E) = \frac{(60 \% \sigma - 20 \% \sigma)}{(60 \% \epsilon_i - 20 \% \epsilon_i)}$$

$$\text{Deflexión máxima} = \frac{C_{max} * L^3}{48 EI}$$

Donde:

C_{max} : Carga máxima

ϵ_i : Deformación específica en el punto de análisis

L_o : Longitud calibrada del espécimen

L: longitud entre apoyos

I: inercia de la muestra

b_v : Ancho de la sección transversal

d: Altura de la sección transversal