



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLCHÓN FLEXIBLE DE  
CONCRETO PARA CONTROL DE EROSIÓN FLUVIAL**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**MAESTRA EN CIENCIAS**

Presenta:

**PATRICIA MARÍN MUÑOZ**

Dirigido por:

**M. en I. GERARDO RENÉ SERRANO GUTIÉRREZ**

Santiago de Querétaro, Qro., Octubre de 2009.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLCHÓN FLEXIBLE DE CONCRETO PARA CONTROL DE EROSIÓN FLUVIAL

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestra en Ciencias (Construcción)

#### Presenta:

Patricia Marín Muñoz

#### Dirigido por:

M. en I. Gerardo René Serrano Gutiérrez

#### SINODALES

M. en I. Gerardo René Serrano Gutiérrez  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

M.C. Carlos Marín López  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Mario E. Rodríguez García  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

M. en I. Rubén Ramírez Jiménez  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Director de la Facultad

\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Hernández Sandoval  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Octubre de 2009  
México

## RESUMEN

El trabajo realizado tuvo como objetivo diseñar y construir un colchón flexible de concreto para control de erosión fluvial, que proporcione resistencia y durabilidad al medio expuesto. Las estructuras de concreto utilizadas en el control de erosión fluvial no poseen la geometría óptima para su mantenimiento o reutilización, además sus componentes no son los adecuados para los medios de contacto, presentando en el corto plazo desgaste, daño y posterior reemplazo de las mismas. Las estructuras de concreto son rígidas y continuas, lo que dificulta su mantenimiento y acorta la vida útil, ya que al retirarlas se deforman causando de esta manera su reemplazo incrementando costos.

El diseño de dichas estructuras no contempla el crecimiento de vegetación riparia que contribuye a la estabilización del suelo además del entorno natural. Considerando lo anterior y tomando en cuenta la vulnerabilidad del concreto a agentes agresivos que ocasionan el deterioro de éste; se diseñó un colchón flexible compuesto por bloques de concreto, elaborados con aditivos comerciales, que aseguran una mayor durabilidad ante los agentes agresivos, que se encuentran en forma natural en el suelo o disueltos en aguas adyacentes a las estructuras de concreto. Adicionalmente se probó su efectividad en diferentes condiciones como fueron pendiente, caudal o superficie de contacto.

Palabras clave: diseño, durabilidad, geometría, vegetación riparia.

## SUMMARY

The research has as aim (objective) to design and build a flexible mattress of concrete for fluvial erosion control, which provides resistance and durability to the exposure environment. The concrete structures used for erosion control do not have the optimal geometry for it's maintenance or reuse, besides it's components are not the appropriate for the contact environment, it presents in the short term damage, deteriorate and replace of those structures increasing costs. Those structures of concrete are rigid and continuous, that make it's maintenance complicated and reduce the useful life, cause when it's removed.

The design of the concrete structures for fluvial erosion control does not include the riparian vegetation growth that contributes to the environmental stabilization. Considering the previous and taking in count the concrete vulnerability to aggressive agents that occasioned it's damage, it was make a design of a flexible mattress compound by concrete blocks, made with commercial additives that guarantee the durability before aggressive agents, that can be found in a natural way in soil and water. Besides it was tested its effectivity by means of hydraulic proubs with different conditions like slope, surface of contact and waterflow.

Keywords: design, durability, geometry, riparian vegetation.





***A mis padres y hermanos***

***A mis abuelitos***

***A César***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por la vida

A mis padres por su amor, dedicación, apoyo, consejos y compañía en la distancia

A mi César por su amor, apoyo incondicional, motivación y ánimo en los momentos difíciles

A los Marcelos por su amistad y ejemplo

Al Dr. Ventura que me brindo su apoyo desde el principio de esta investigación y por sus acertadas correcciones

A Charlie, por su amistad y por echarme la mano en la co-dirección de este documento

A los sinodales por sus observaciones

A Flower por su gran amistad y cariño

A los grandes amigos Mexicanos que me encontré en esta etapa de la vida, que de una u otra forma ayudaron en el desarrollo de esta tesis y que seguirán ocupando un espacio especial en mi corazón.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY .....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
I.2. ANTECEDENTES.....	1
I.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO.....	14
I.4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	14
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
2.1. Erosión fluvial.....	16
2.1.1. Vegetación ribereña.....	18
2.2. El concreto y sus componentes.....	19
2.2.1. Cemento.....	20
2.2.2. Agua.....	22
2.2.3. Agregados.....	23
2.2.3.1. Caracterización de agregados.....	24
2.3. Porporcionamiento o diseño de la mezcla de concreto.....	26
2.3.1. Diseño de la mezcla de concreto con aditivos.....	27
2.3.2. Curado de las muestras.....	27
2.4. Durabilidad del concreto endurecido.....	28
2.4.1. Mecanismos de deterioro del concreto endurecido.....	28
2.5. Abrasión en el concreto endurecido.....	29
2.6. Microscopia electrónica de barrido.....	30
III. METODOLOGIA.....	32
3.1. Diseño geométrico.....	32

3.2. Proporcionamiento de mezclas de concreto y elaboración de las muestras cilíndricas.....	33
3.2.1. Caracterización de agregados.....	33
3.2.2. Proporcionamiento o diseño de la mezclas de concreto endurecido.....	36
3.2.3. Curado de muestras.....	39
3.3. Propiedad mecánica: resistencia a la compresión simple.....	40
3.4. Propiedades físicas.....	40
3.5. Pruebas de durabilidad.....	42
3.6. Análisis complementario.....	43
3.6.1. Microscopia electrónica de barrido.....	43
3.6.2. Análisis estadístico.....	45
3.6.3. Evaluación hidráulica de un bloque constitutivo del colchón.....	45
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1. Propiedades del bloque.....	49
4.2. Caracterización de agregados.....	49
4.3. Resistencia a la compresión simple.....	51
4.3.1. Análisis estadístico de los resultados antes del ataque con $MgSO_4$ .....	53
4.4. Resistencia a la compresión simple después del ataque con $MgSO_4$ .....	55
4.4.1. Análisis estadístico de los resultados con de las mezclas atacadas con $MgSO_4$ .....	57
4.5. Absorción.....	59
4.6. Análisis de imágenes, Microscopia electrónica de barrido.....	60
4.7. Evaluación hidráulica de un bloque .....	64
4.8. Evaluación económica de un bloque.....	65
V. CONCLUSIONES.....	67
REFERENCIAS .....	69
APÉNDICES.....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
2.1. Fórmula química de la fase primaria y secundaria de la etringita.....	21
2.2. Características químicas del agua para concreto .....	23
2.3. Factores de degradación del concreto.....	29
4.1. Datos de absorción para los agregados.....	50
4.2. Composición granulométrica de la arena .....	50
4.3. Composición granulométrica de la grava.....	51
4.4. Número de muestras por mezcla.....	51
4.5. Módulo de elasticidad de las mezclas a 28 días.....	52
4.6. Resumen estadístico de resistencia a la compresión simple.....	53
4.7. Anova de resistencia a la compresión simple.....	54
4.8. Prueba de rangos múltiples de compresión simple.....	54
4.9. Módulo de elasticidad de las mezclas a 28 días, expuestas a $MgSO_4$ .....	56
4.10. Resumen estadístico de resistencia a la compresión simple, después del ataque del $MgSO_4$ .....	57
4.11. Anova de resistencia a la compresión simple, después del ataque con $MgSO_4$ .....	58
4.12. Prueba de rangos múltiples de compresión simple, después del ataque con $MgSO_4$ .....	58
4.13. Absorción de las tres mezclas a los 28 días.....	60
4.14. Resultados de la evaluación hidráulica.....	64
4.15. Costo de materiales para elaboración de un bloque.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
1.1. Protección marginal con tapetes de concreto.....	2
1.2. Filtro hidrostático.....	3
1.3. Flexblock.....	4
1.4. Growth matt.....	5
1.5. Enrocado.....	6
1.6. Colchacreto.....	7
1.7. Bolsacreto.....	8
1.8. Colchón flexible de concreto a escala de 0.3.....	9
2.1. Fotografía con MEB, etringita cristalina.....	21
2.2. Fotografía con MEB, etringita coloidal.....	22
3.1. Dimensiones del bloque.....	33
3.2. Mezcla simple para elaboración de muestras.....	37
3.3. Elaboración de muestras de concreto endurecido.....	38
3.4. Adición de Sikacrete 950-DP.....	38
3.5. Adición de Sikafiber.....	39
3.6. Máquina cortadora de concreto endurecido.....	41
3.7. Secciones de muestra cilíndrica para prueba de absorción.....	42
3.8. Superficie de acrílico del canal de pendiente variable.....	46
3.9. Superficie de tela de uso rudo (jerga).....	47
3.10. Superficie de tapete antideslizante.....	47
3.11. Diagrama de fuerzas.....	48
4.1. Flexibilidad del colchón.....	49
4.2. Gráfica de resistencia máx. a la compresión simple de las mezclas.....	52
4.3. Gráfica de resistencia máx. a la compresión simple, expuestas a $MgSO_4$ .....	56
4.4. Micrografía de la mezcla simple a 28 días.....	61
4.5. Micrografía de la mezcla simple a 28 días, atacada con $MgSO_4$ .....	62
4.6. Micrografía de la mezcla sikacrete 950-DP a 28 días.....	62

4.7. Micrografía de la mezcla sikacrete 950-DP a 28 días, atacada con MgSO <sub>4</sub> .....	63
4.8. Micrografía de la mezcla sikafiber a 28 días.....	63
4.9. Micrografía de la mezcla sikafiber a 28 días, atacada con MgSO <sub>4</sub> .....	64



## **I. INTRODUCCIÓN**

### **I.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El desprendimiento, arrastre y transporte de partículas del suelo por la constante acción abrasiva del agua es un problema global, ya que ésta en su curso natural erosiona las márgenes de ríos y zonas costeras. Los métodos para control de erosión fluvial son muy variados; entre ellos se incluyen elementos estructurales elaborados en su mayoría a partir del concreto. Sin embargo, su efectividad depende del diseño, funcionalidad y durabilidad de este último.

En el caso específico de elementos estructurales para el control de la erosión en márgenes de ríos, los colchones flexibles de concreto han sido utilizados como una alternativa. No obstante, los diseños actuales a pesar de revestir las márgenes carecen de la geometría adecuada, que permita el establecimiento de la vegetación riparia que favorezca la funcionalidad del sistema. Además, no se considera la agresividad de los sulfatos presentes en el agua y suelo de forma natural, que ingresan al concreto endurecido expandiéndolo y agrietándolo, por lo cual su vida útil se acorta.

Por lo anterior, es necesario desarrollar diseños de colchones flexibles de concreto que controlen la erosión fluvial de un modo eficiente y que ofrezcan una mayor durabilidad mediante la selección de los componentes adecuados.

### **I.2 ANTECEDENTES**

La estabilización del margen de los ríos es esencial para el diseño de algunas estructuras en su ambiente. La localización de áreas propensas a la erosión y la estimación cuantitativa de las tasas de pérdida de suelo, son de gran importancia para diseñar y aplicar el apropiado control de la erosión y prácticas de conservación para evitar esta situación (Shi *et. al.*, 2004). Para este propósito, se

han utilizado obras que se construyen a lo largo de la orilla de los ríos, con el objeto de evitar el contacto directo del escurrimiento con el material de la margen, y disminuir la velocidad del flujo (Rivera *et. al.*, 2005).

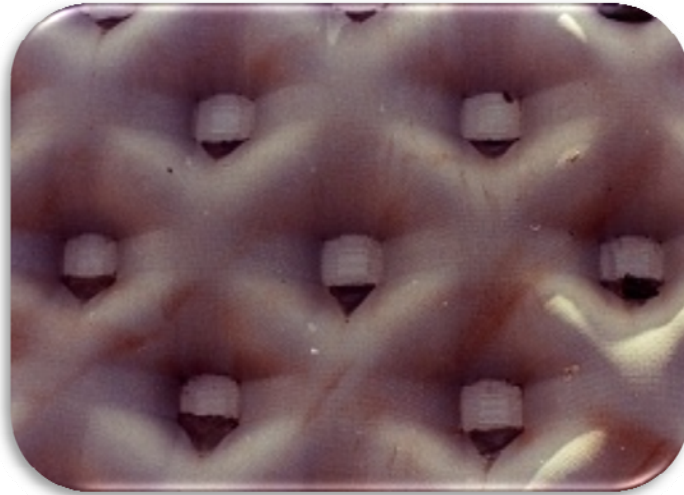
Arroyo (2006), reportó que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó estudios, análisis técnicos y simulaciones matemáticas de siete alternativas para proteger el derecho de vía del margen del río, que concluyó en el diseño de una protección marginal flexible impidiendo la pérdida del material de la margen, que además de provocar la sedimentación de los sólidos que arrastraba el agua del río y permitió el vaciado del agua acumulada sobre la corona del talud, contribuyendo a la recuperación de la flora natural y no contaminó el medio ambiente natural. Ver Figura 1.1.



**Figura 1.1** Protección marginal con tapetes de concreto  
([www.projectlink.com.au/.../thb\\_icmtqngtye4h.jpg](http://www.projectlink.com.au/.../thb_icmtqngtye4h.jpg), consultado en 2009)

En la revisión de literatura se encontró además, un colchón de concreto del tipo filtro hidrostático, de la empresa Revetment Systems International Group, que se encarga de la protección de erosión con concreto encajonado mediante tejido; que es una estructura monolítica rígida para el control de erosión fluvial conformada a partir de un geotextil de tercera generación y alta tecnología, el cual consta de dos capas pretejidas, cortadas y cocidas *in situ* a las que se inyecta un

mortero de concreto de agregado fino. El sistema especializado de tejido multidireccional empleado en su confección, permite que las distintas capas de material del tejido puedan ser unidas en un lugar específico para formar filtros hidrostáticos que permiten que este sistema de revestimiento pueda literalmente "respirar", aliviando así la presión hidrostática que pueda existir detrás de la estructura instalada (RSIG, 2009). Ver Figura 1.2a y 1.2b.



a)



b)

**Figura 1.2 a)** Configuración del sistema filtro hidrostático

**b)** Colocación en taludes del filtro hidrostático

([www.revetmentsystems.com/products.html](http://www.revetmentsystems.com/products.html), consultado en 2009)

Otra opción para estabilización de taludes, es el sistema tipo "flexblock", está diseñado para acomodarse a los movimientos del suelo subyacente

manteniendo intactas las características asociadas al sistema anteriormente mencionado “filtro hidrostático”. Esta característica resalta de manera singular el concepto de control de erosión con concreto confinado en un geotextil (Figura 1.3a y 1.3b). El proceso de tejido intercalado, desarrollado por revetment systems International group, forma un colchón dividido en paneles, interconectados a su vez por conductos hechos también en el geotextil, los cuales permiten el inflado continuo y uniforme del colchón (RSIG, 2009).



a)



b)

**Figura 1.3 a) Configuración del sistema flexblock**  
**b) Colocación del flexblock en el terreno**  
([www.revetmentsystems.com/products.html](http://www.revetmentsystems.com/products.html), consultado en 2009)

El growth matt (Figura 1.4) de revetment internacional system Group, fue diseñado para utilizar los efectos de unión y camuflaje natural, ofrecidos por el crecimiento de la vegetación con el de protección de taludes a través del colchón, logrado gracias a la incorporación de una rejilla continua a lo largo de los conductos de inflado. Este sistema llamado “growth matt”, es colocado sobre el suelo a proteger e inyectado con el mortero de agregado fino. El tejido entre las rejillas tubulares sirve el propósito de retención del suelo antes del establecimiento de la vegetación a través del colchón. Una vez que el área sembrada se establece, el tejido entre las rejillas ayuda a mantener a la vegetación adherida a su estructura, formando así un escudo protector integro contra la erosión. El colchón puede ser pintado *in situ* o en fábrica, para camuflar aun más el producto (RSIG, 2009).



**Figura 1.4. Growth matt**  
([www.revetmentsystems.com/products.html](http://www.revetmentsystems.com/products.html), consultado en 2009)

Para el control de erosión en los márgenes de los ríos se utilizan comúnmente los gaviones, que son contenedores prismáticos rectangulares, formados con malla hexagonal de triple torsión de alambre de acero recubierto, generalmente con celdas internas uniformemente repartidas, reforzados en todas sus aristas con alambres de mayor diámetro que el del utilizado en la fabricación de la malla y con atiesadores de alambre igual al que se utiliza para los amarres, conectados a las caras frontal y trasera del contenedor para disminuir su



deformación. Estos gaviones forman una sola estructura permeable y continua para el control de erosión de canales, ríos y zonas costeras (SCT, 2006). Se encontró que las estructuras en gaviones presentan una vida útil corta, ya que cualquier contacto de este con una piedra arrastrada por el río puede reventar el alambre y conducir a que el gavión se desocupe rápidamente. Además, por lo general los gaviones se llenan con piedras pequeñas que pueden ser arrastradas fácilmente por el agua al quedar el gavión suelto. Estas estructuras también se pueden volcar el sistema en poco tiempo (Gray y Sotir, 1996).

Un material antiguamente manejado en las márgenes de los ríos es la piedra, que durante muchos años se ha utilizado para la protección contra la erosión fluvial debido principalmente a su peso, que resiste fuerzas tractivas muy altas es el enrocado. Este sistema consiste en acomodar piedras, estas se utilizan como protección de taludes apoyados en un geotextil, espigones y rompeolas que se colocan a lo largo de las orillas de ríos y los diques de retención que se utilizan también para control de erosión en el cauce del río (Figura 1.5). Los principales problemas en la producción de enrocado son; el agrietamiento de las rocas debido al transporte, la desintegración ya que las grandes rocas se rompen y laminación en rocas sedimentarias (Suárez, 2001).



**Figura 1.5. Enrocado**  
(<http://images.google.com.mx/images/riprap>, consultado en 2009)

Otra variedad en cuanto a sistemas de recubrimiento marginal son los colchacretos (Figura 1.6), que son recubrimientos consistentes en dos capas de geotextil cosidas, en cuyo espacio interior se tiene concreto, mortero o lechada de cemento; su espesor varía entre 8 y 30 cm. Esta colcha de concreto proporciona estabilización de suelo debido a su peso pero impide el crecimiento de vegetación propia de las orillas de río en el área cubierta. La desventaja que presenta este método es su difícil mantenimiento, ya que cubren gran parte del área afectada pero no es posible un continuo control porque al ser de concreto son rígidos y se rompen cuando son removidos de su posición original (Suárez, 2001).



**Figura 1.6.** Colchacreto

([http://images.google.com.mx/images/concrete\\_blanket](http://images.google.com.mx/images/concrete_blanket), consultado en 2009)

Una propuesta similar para el control de erosión fundiendo *in situ* concreto en bolsas de geotextil, es el bolsacreto. Al colocar las bolsas, una sobre otra se acomodan a la superficie formando un conjunto muy resistente. Las bolsas para bolsacreto se confeccionan según dimensiones establecidas en el diseño ( $1 \text{ m}^3$  ó  $2 \text{ m}^3$ ). Las bolsas contienen la masa de mortero o de concreto, las cuales conforman un sistema similar a un enrocado entrelazado de gran tamaño. El tejido de polipropileno permite la salida de agua favoreciéndose el fraguado de la mezcla. Los poros de la tela deben tener un tamaño tal que no permitan la salida de la mezcla de concreto. En ocasiones estas bolsas se rellenan de arena o de suelo-cemento. Cada bolsa debe tener una válvula autosellante para colocar la manguera por el cual se inyecta la mezcla de concreto. Durante el llenado se debe impedir la formación de cavidades con aire dentro de la bolsa. Una vez llenado, se

retira la manguera y el cierre debe actuar inmediatamente. Las cubiertas de polipropileno de los bloques una vez fraguados se descomponen y pueden desaparecer.

Los bolsacretos (Figura 1.7), se pueden colocar conformando un muro o un recubrimiento o pueden ser lanzados al agua después de rellenos para la protección contra la socavación en pilas de puentes o para la construcción de sistemas de control del fondo de cauces (Suárez, 2001). Debido a lo grandes pesos (2,2 ton) individuales, a la mano de obra calificada que se necesita para su instalación, al transporte y costo de la maquinaria, resultan muchas desventajas con este sistema, además solo son sacos en pila, así que nunca se da el crecimiento de vegetación nativa creando así un impacto visual desfavorable (Murria, 2001).



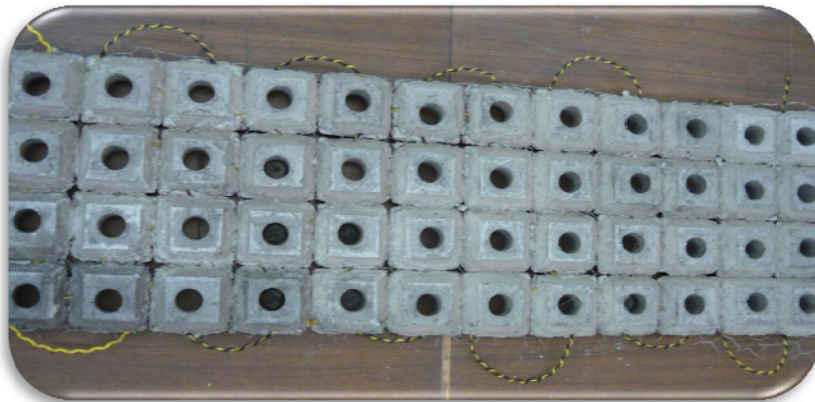
**Figura 1.7** Bolsacreto ([www.coval.com.co](http://www.coval.com.co), consultado en 2009)

Por último, en la literatura revisada se manejan las geoceldas para estabilizar taludes o márgenes de río, que son construidas con cintas de polietileno de alta densidad soldadas a intervalos regulares para formar un panel tridimensional en forma de panel. Las celdas vienen comprimidas en un sistema de acordeón el cual puede extenderse. Una vez extendidas las celdas se rellenan con material granular o con concreto.



Las celdas se colocan sobre geotextil y material de soporte. Su espesor es de aproximadamente 20 centímetros y los espacios de las celdas son de aproximadamente 20 a 24 centímetros (Suárez, 2001).

En la facultad de ingeniería de la Uaq, paralelo a esta investigación se adelantó una evaluación hidrológica e hidráulica del sistema de colchón flexible de concreto a escala 1.3 (Figura 1.8). Para dicha evaluación, se construyó un prototipo de fácil manipulación y además que se pudiera acoplar fácilmente a los canales de pendiente constante de la Universidad Autónoma de Querétaro para dichas pruebas. El colchón de 1.20 m de largo y 0.40 m de ancho, se construyó en un molde de hierro, que estaba dividido en dos partes, en la parte inferior se depositaba la mezcla y previamente se había colocado un tubo de PVC engrasado en el centro. Colocada la primera capa se colocó la parte superior del molde y se terminaba de colar, se desmoldaba a las 24 horas y se retiraba con facilidad por medio de las asas laterales proporcionadas por el cable de polipropileno.



**Figura 1.8** Colchón flexible de concreto a escala de 1.3

Por otro lado, y como se menciona en la descripción del problema, el concreto presenta desventajas en los medios expuestos presentando una corta vida útil, dichos agentes de deterioro se describen a continuación. Las acciones físicas de deterioro en el concreto expuesto a condiciones ambientales se deben a cambios térmicos; heladas; abrasión o erosión, fenómenos de impacto, exposición al fuego. Las acciones químicas generalmente causan el mayor daño, siendo el

cemento el componente atacable en el concreto y el agua el elemento motor del proceso corrosivo. Estas acciones dan lugar a reacciones de hidrólisis, lixiviación e intercambio de elementos y formación de productos expansivos. Pertenecen a esta clase los fenómenos de: carbonatación, reacción agregado-álcali, ataque por sulfatos, acción de agentes biológicos, entre otros.

Los mecanismos físicos de deterioro se asocian con la disolución de compuestos de la pasta en el medio, con pérdida de masa, aumento de porosidad y decremento en la resistencia. Los mecanismos químicos corresponden al intercambio de iones de la pasta con el medio dando lugar a compuestos. Una propiedad que está relacionada directamente con el ingreso de los agentes agresivos es la porosidad. En el concreto la porosidad es el 20% del volumen del material y depende, principalmente, de la relación agua/cemento, de la compactación y del curado (factores típicos que influyen en las principales propiedades físicas del material), (Solís *et. al.*, 2005).

La carbonatación comprende los fenómenos que resultan de la acción del dióxido de carbono sobre la pasta de cemento o el concreto, actúa sobre los constituyentes anhidros o hidratados del cemento. La carbonatación del concreto depende de numerosos parámetros internos o externos como la humedad relativa, temperatura, presión, permeabilidad y porosidad del concreto. Debe considerarse, que todos estos factores son dependientes de la dosificación del cemento, condiciones de hidratación, cantidad de agua y edad del concreto. La carbonatación puede tener un aspecto beneficioso de protección en concreto, como sucede en los elementos marítimos inmersos. Generalmente la contracción por carbonatación no es identificada y es asumida dentro de los valores de contracción y fisuración por secado (González, 2001). La carbonatación se refiere a la formación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) por reacción química en el concreto. La creación de carbonato de calcio requiere de tres sustancias importantes: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), calcio (Ca), y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). El dióxido de

carbono está presente en el aire circundante, el calcio (principalmente  $\text{Ca(OH)}_2$  y CSH) están en el concreto, y el agua en los poros del mismo (Kurdowski, 1993).

Otra de las causas del deterioro del concreto es la denominada reacción álcali-agregado, que se origina entre determinados agregados activos y los óxidos de sodio y potasio del cemento. La reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la interfase con la pasta de cementos formando un gel que toma agua y se dilata creando presiones internas que llevan a la rotura del material. La expansión y agrietamiento del concreto liderados por la pérdida de resistencia y su módulo de elasticidad puede resultar de la reacción química que comprende los iones álcalis con los iones hidroxilos de la pasta del cemento portland y algunos minerales reactivos de silicio que están generalmente en los agregados (Mehta, 2003).

La reacción álcali agregado comprende los siguientes sistemas: Reacción álcali – sílice; Reacción álcali – silicato; Reacción álcali – carbonato. Para que se produzca la reacción álcali - sílice se requiere la presencia de tres condiciones: agregados reactivos, cemento con alto contenido de álcalis y humedad. Estas reacciones se presentan con mayor intensidad en climas cálidos por los siguientes factores; humedad ambiente elevada; temperatura, en especial creciente de 20 a 40°C y fisuras de contracción plástica. La reacción entre los álcalis del cemento y del agregado, es de carácter expansivo, dando como resultados el agrietamiento del concreto. La reacción sílice agregado se presenta formando dos zonas alrededor de los agregados fracturados y a lo largo del plano de rotura. El tipo de reacción álcali - silicato no debe ser confundida con aquellas otras comprendidas dentro de la denominación álcali-agregados. Sin embargo, en algunos casos puede presentarse conjuntamente con la reacción álcali-sílice. Se caracteriza porque progresa más lentamente y forma gel en pequeña cantidad. Se estima que esta reacción se debe a la presencia de ciertos filosilicatos. En general, el conocimiento de este fenómeno es incipiente y más complejo, no se ha llegado a conclusiones sobre la expansión y el deterioro que ocasionan. Por último, el fenómeno de la reacción álcali - carbonato se presenta cuando el concreto está

sometido a atmósfera húmeda. Se ha planteado que la expansión se debe a la transformación de la dolomita en calcita y brucita, fuertemente expansiva, que tiene la forma de un gel que origina presión debido al crecimiento de los cristales (Mejía y Rodríguez, 1999), (Helene, 2003).

Respecto al ataque de los sulfatos en la estructura interna del concreto, se encontró que es una de las formas más frecuentes de ataque químico al sistema. El ión sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas. El contenido de ión sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales. En zonas áridas los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario. Los sulfatos más abundantes en el suelo son: sulfatos de calcio, magnesio, sodio y calcio, todos ellos de diferente solubilidad. La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio  $C_3A$  y el ferroaluminato tetracálcico  $C_3FA$ . El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación blanca y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y suave. La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferroaluminato tetracálcico, produciendo sulfoaluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita). La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita (González, 2001). Los iones de sulfato reaccionan químicamente con algunos constituyentes del cemento hidratado, produciendo sulfoaluminato hidratado y yeso, que son los causantes de la expansión y agrietamiento del concreto. El sulfato de magnesio reacciona con la portlandita dando hidróxido de magnesio (que forma una capa protectora del concreto) y yeso secundario, para formar a continuación la etringita (Aziz *et. al.*, 2004).

Los agentes biológicos que actúan sobre el concreto generando un deterioro de orden químico, son: las bacterias, hongos y líquenes, estos últimos en cuanto forman colonias de tamaño microscópico. El desarreglo que generan es superficial y sólo se produce en concretos carbonatados y húmedos, cuya superficie se encuentra sucia o ha acumulado materia orgánica que sustente su crecimiento. El ataque no es directo sino por la acción química del metabolismo. Los microorganismos no pueden existir dentro del concreto, por constituir un ambiente hostil, no sólo carente de nutrientes orgánicos sino con un valor de pH alto que impide su vida. Se han comprobado deterioros en los concretos en obras marítimas y en zonas costeras, especialmente en climas cálidos por la acción de moluscos marinos que llegan a perforar el material con una acción combinada química y mecánica (González, 2001).

Para evitar algún proceso de deterioro nombrado anteriormente y particularmente el ataque por sulfatos en el concreto, se utilizan los aditivos, que son sustancias que se emplean como ingrediente de la pasta, mortero o concreto y que incorporadas durante su proceso de mezclado contribuyen al mejoramiento de algunas propiedades específicas. Estos productos permiten modificar la reología del concreto fresco, mejoran su manejabilidad, disminuyen la exudación y la segregación. A nivel de concreto endurecido se logran incrementos en resistencia a la compresión simple y en su comportamiento frente a acciones químicas o físicas, es decir, su durabilidad. El empleo de los aditivos puede radicar por razones de economía o por mejorar puntualmente alguna propiedad del concreto tanto en estado fresco o endurecido como por ejemplo: reducir el calor de hidratación o aumentar la resistencia inicial o final (Torres, 2004). Un aditivo es un material diferente del agua, de los agregados y del cemento hidráulico, que se emplea como componente del concreto o mortero y se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado, modificando algunas características del concreto, según la norma ASTM C 125 *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*.

### **I.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

Los sistemas para control de erosión fluvial son en su mayoría de concreto y en su objetivo de revestir taludes y las orillas del río, olvidan la importancia de la vegetación riparia que crece de modo natural en estas zonas de frontera entre ecosistemas terrestres y acuáticos. Los revestimientos de concreto actuales son continuos y rígidos, su vida útil se acorta debido al contacto con el agua y el suelo, que contienen de forma natural sulfatos que ingresan a la estructura del concreto deteriorándolo, agrietándolo y ocasionando alto costo de mantenimiento y su rápido reemplazo, debido también a la baja funcionalidad por la deficiencia en su diseño y en los componentes de la mezcla. El presente trabajo se justifica en el aprovechamiento de las ventajas que puedan presentar los sistemas actuales para control de erosión fluvial y la optimización de su diseño de manera eficiente, para realizar un control de erosión y a la vez propiciar el crecimiento de la vegetación, la cual re-enforza la estabilización del talud por medio del enraizamiento de esta. Adicionalmente, el uso de compuestos protectores contra el deterioro químico en la mezcla, ayudara a una mayor durabilidad del sistema.

### **I.4 OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

#### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, construir y evaluar un colchón flexible de concreto de alto desempeño y durabilidad para el control de la erosión fluvial, que cumpla con las normas y que a la vez permita el establecimiento de la vegetación.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar la geometría de un colchón flexible de concreto que garantice el control óptimo de la erosión fluvial y favorezca el crecimiento de vegetación riparia.

2. Determinar las propiedades mecánicas de compresión simple de la mezcla de concreto utilizada para la construcción del colchón flexible.
3. Evaluar el comportamiento de las mezclas sumergidas en sulfato de magnesio, respecto a su resistencia a la compresión simple
4. Evaluar el comportamiento hidráulico de un elemento constitutivo del colchón flexible de concreto bajo el efecto de diferentes gastos y velocidades de flujo.

### **HIPÓTESIS GENERAL**

La proporción de aditivos y agregados de la mezcla de concreto, así como el diseño geométrico de los elementos del colchón flexible, aseguran una mayor resistencia a las condiciones ambientales adversas garantizando una mayor durabilidad.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Erosión fluvial

La erosión fluvial es un proceso geomorfológico natural o disturbio que ocurre durante o poco después de lluvias torrenciales o inundaciones. Las orillas de los ríos son fronteras entre los ecosistemas acuáticos y terrestres, frecuentemente cambian naturalmente bajo condiciones dinámicas e hidrológicas. Aunque la evidencia sugiere que la erosión fluvial es un proceso ecológico necesario (Piegay *et. al.*, 1997, 2005), el manejo de la corriente del río y a veces algunas estrategias de restauración, requieren infraestructura a orillas del canal, es decir, elementos estructurales intentando contrarrestar la erosión fluvial (también llamados revestimiento, control de erosión o obras de estabilización de taludes). La erosión fluvial ocurre durante las inundaciones cuando la velocidad del flujo cerca de la orilla y la aceleración ejercen un esfuerzo cortante en las orillas que es mayor que el esfuerzo crítico de corte necesario para acarrear sedimentos de la orilla. La erosión fluvial escurre del pie del talud, causando que la parte superior colapse (Thorne y Tovey 1981).

La estabilidad del material que forma las orillas, lo mismo que la cantidad y clase de vegetación que en ellas crezca y la velocidad del flujo, influyen directamente sobre los riesgos de erosión. Cuando el terreno aledaño a la corriente de agua es de naturaleza arenosa o contiene porciones grandes de grava, ofrece muy poca resistencia a la acción abrasiva de la corriente y la erosión puede llegar hasta grados muy avanzados, máxime si se ha destruido la vegetación que crecía en sus taludes (Suárez de Castro, 1982).

Cuando las aguas del río avanzan y golpean en algunos puntos de las bases de sus taludes, ocurren socavamientos y desplomes, los cuales están relacionados con la presencia de horizontes sueltos con materiales gruesos (conglomerados), especialmente en ausencia de raíces de vegetación nativa. Al



ser socavado el segundo horizonte, se origina el desplome rápido del primero, convirtiéndose en un proceso remontante, que dependiendo de la pendiente y longitud del talud o ladera, puede llegar a desestabilizar gran parte de la cuenca. La mayoría de los sedimentos que arrastran los ríos, provienen de socavamientos, desplomes, y retomas de materiales asentados en los tramos medios e inferiores.

El termino inestabilidad del talud, es usado para describir la deformación del talud y el termino falla cuando aparece el movimiento. Los movimientos en masa abarcan una serie de rangos de deformación de pendiente asociadas con la inestabilidad del talud. Adicionalmente, el deslizamiento a lo largo de un plano de plano diferente, que incluye el libre descenso de rocas y movimientos en masa (fallas, derribados), esta última exhibe un componente rotacional y flujos (Varnes, 1978). La estabilidad de un talud depende del equilibrio entre las fuerzas dirigidas y las restauradoras, que actúan potencialmente sobre la inestabilidad de la masa de suelo. Las fuerzas dirigidas que actúan en el material de la pendiente incluyendo la gravedad, resultan en esfuerzo cortante,  $\tau$ , que debe ser contrareestado con la resistencia al esfuerzo cortante disponible.

El criterio de la falla de Mohr-Coulomb describe la resistencia al esfuerzo cortante disponible de rocas y suelos en muchos casos, y es el más extensamente usado en la ecuación constitutiva de la resistencia al esfuerzo cortante. Este criterio atribuye a la resistencia al esfuerzo cortante del material de cohesión finita y a la componente friccionante. La cohesión es expresada como el esfuerzo y puede ser interpretada como el total de las fuerzas atractivas entre partículas por especímenes de área representativa del material, el plano de corte a lo largo del cual la resistencia al esfuerzo constante se moviliza. Este esfuerzo es el mayor constituyente de la resistencia de los suelos plásticos o finos como arcillas y limos. La resistencia a la fricción es movilizada por el contacto de las partículas e incrementa con el tamaño de esta última. El componente de fricción es proporcional a las fuerzas inter-partículas, esto es representado por el esfuerzo normal actuando en el área representativa del espécimen,  $\sigma'$ . En la falla, la

máxima resistencia al esfuerzo cortante disponible es movilizada y es expresada como sigue (Lambe & Whitman 1979):

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Donde  $\tau_f$  es la resistencia al esfuerzo cortante de falla,  $c'$  es la cohesión,  $\sigma'$  es el esfuerzo normal (todo en unidades de esfuerzo) y  $\phi'$  es el ángulo interno de fricción. Cuando las presiones de poro (condiciones de saturación) están presentes, estas soportan parte del esfuerzo entre partículas, y el esfuerzo normal total,  $\sigma$ , se reduce por la presión de poro  $u$  para definir el esfuerzo normal efectivo,  $\sigma'$ .

$$\sigma' = \sigma - u$$

En períodos lluviosos, con precipitaciones de largas duraciones e intensidades altas, se presentan caudales torrenciales, que socavan el fondo del cauce y los taludes laterales de ríos y cañadas cuando en estos se ha eliminado su vegetación natural, originando procesos erosivos acelerados y como consecuencia la desestabilización de laderas y la formación de cárcavas profundas de tipo remontante y movimientos masales, que conducen a disminuir en forma paulatina e irreversible el área productiva y los cultivos allí establecidos (Rivera, 2002).

### **2.1.1. Vegetación ribereña**

La vegetación ribereña influye en la estabilidad de las orillas de los ríos (Simon y Collinson, 2002) ya que el tipo y densidad de vegetación las cubre y las raíces que estabilizan el talud minimizan la erosión fluvial (Pizzuto y Mecklenburg 1989). Los bosques riparios generalmente preservan la estabilidad de la orilla, pero el flujo que escurre alrededor de las piezas individuales de madera derivadas del bosque ribereño puede acelerar las tasas locales de erosión fluvial (Montgomery 1997).

Los bosques de galería (bosques riparios o vegetación ribereña), son las comunidades vegetales que se desarrollan a lo largo de corrientes de agua, las cuales mantienen la integridad de los ríos, arroyos y riberas (Rzedowski, 1994; Norris, 2001; Ceccon, 2003). Son áreas de vegetación que pueden definirse como la interfase de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Ocupan franjas angostas a lo largo de corrientes fluviales, se distinguen de los bosques localizados en áreas aledañas, por poseer un mayor número de especies siempre verdes (Lamprecht, 1990). Por desarrollarse a lo largo de los ríos y en las riberas de lagos de agua dulce, están considerados como parte de una vegetación de tipo ripario (Latin: *ripa* = banco) o ribereña. Esta vegetación posee características propias que la hacen particular, como son la capacidad de soportar inundaciones temporales e invadir rápidamente áreas expuestas o bancos de grava (Treviño *et. al.*, 2001).

La presencia de la vegetación ribereña sombrea el cauce, y con ello disminuye la temperatura del agua, con lo que mejora su contenido de oxígeno disuelto. Este efecto de sombreado también regula la entrada de luz en el agua, retardando el crecimiento de las algas (González y García, 2001). Los árboles y los arbustos definen y confinan el canal, llegándolos a ser más estrechos y más profundos (Rood *et. al.*, 2003). Al mismo tiempo contribuye a la estabilidad de las orillas a través de su sistema radical, disminuyendo el riesgo de erosión por la acción de la corriente. La presencia de raíces aumenta la cohesión del suelo y su resistencia, a la vez que disipa la energía y velocidad de las aguas (González y García, 2001). Estos servicios ecológicos mantienen la calidad del agua y proveen protección contra las inundaciones (Timoney *et. al.*, 1997).

## **2.2. El concreto y sus componentes**

El concreto de uso común o tradicional, se produce mediante la mezcla de tres componentes: cemento, agregados pétreos y agua, a los cuales eventualmente se incorporan otros materiales para lograr propiedades específicas.

La mezcla de estos componentes produce una masa plástica que, una vez moldeada y compactada, adquiere características de rigidez convirtiéndose en un producto sólido mecánicamente resistente. El concreto convencional en estado fresco, es un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido (Torres, 2004).

El concreto es un material compuesto, en el cual existe una gran variabilidad en las características de sus componentes, especialmente en los agregados pétreos. Siendo éstas de carácter físico y químico, producen diferentes efectos, tanto en la trabajabilidad del concreto como en su comportamiento en estado endurecido, el cual regirá su vida de servicio (Chan *et. al.*, 2003).

### **2.2.1. Cemento**

El cemento se obtiene por pulverización del clínker, obtenido por calentamiento a fusión parcial, de una mezcla homogénea de materiales que contienen principalmente cal ( $\text{CaO}$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), con pequeñas porciones de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Como componentes secundarios están incluidos los residuos insolubles,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_3$ .

La humedad o el agua, juegan el rol más importante en el fraguado, el desarrollo de resistencia y el eventual deterioro del concreto. El cemento portland se endurece debido a un proceso químico llamado hidratación. Esto significa que los minerales silicato y aluminato en el cemento portland reaccionan y se combinan con agua para producir la "cola" que mantiene juntos a los agregados que se denomina concreto. El agua, dependiendo de la calidad y naturaleza del agregado usado y la historia del curado del concreto, disparar sucesos deletéreos como la reactividad álcali agregado (RAA) o la formación de etringita diferida

(FED). El agua también actúa como un medio de transporte para especies potencialmente agresivas, tales como sulfatos, para entrar en el sistema y causar deterioro (Johansen *et. al.*, 2002).

Las reacciones FED (Formación de Etringita Diferida) que están asociadas con la exposición del concreto a altas temperaturas durante el curado, en sistemas que contienen cementos de sulfato normal, han sido un tópico de atención en las discusiones durante algún tiempo. En la Tabla 2.1 se muestra la formula química de las dos fases en que se presenta la etringita.

**Tabla 2.1** Formula química de la fase primaria y secundaria de la etringita (Estrada, M. *et. al.*, 2005)

Etringita			Contenido de Agua (% en peso)
Trisulfato (Etringita)	Hexagonal	3 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3SO <sub>4</sub> 32H <sub>2</sub> O (AC <sub>3</sub> sC <sub>3</sub> H <sub>32</sub> )	45,9
	acicular		
Monosulfato (Etringita)	Hexagonal	3 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>4</sub> 12H <sub>2</sub> O (AC <sub>3</sub> sC <sub>3</sub> H <sub>12</sub> )	34,7
	tabular		

Los resultados FED de una reacción química o conjuntos de reacciones, no están aún bien estudiadas, pero la diagnosis es relativamente simple; de la expansión de la pasta en el concreto afectado, resulta el deterioro. En las Figuras 2.1 y 2.2, se observan las formaciones características aciculares de la fase etringita en cemento Pórtland normal (Estrada, M. *et. al.*, 2005).



**Figura 2.1** Fotografía con MEB, etringita cristalina (Estrada, M. *et. al.*, 2005)



**Figura 2.2** Fotografía con MEB, etringita coloidal (Estrada, M. *et. al.*, 2005)

La etringita (también conocida como “bacilo del cemento” o “sal de Candlot”), presenta un volumen 2,5 mayor al aluminato de partida; lo que provoca una expansión que deriva en una desagregación del hormigón (al desaparecer el conglomerante y quedar “desnudo” el árido). Esa reacción se inicia en la superficie del hormigón en contacto con el medio agresivo, y va progresando poco a poco hasta llegar no sólo a poner en peligro la resistencia de éste, sino a facilitar el acceso a las armaduras de otros agentes externos (como cloruros, oxígeno, CO<sub>2</sub>, agua, etc).

### **2.2.2. Agua**

Desde el punto de vista de la durabilidad del concreto es fundamental considerar, además del cemento y las adiciones, el agua, la cual tiene dos aplicaciones; como ingrediente en la elaboración de la mezcla (agua para amasado) y como medio de curado de las estructuras recién elaboradas. La calidad del agua que se utiliza para elaborar la mezcla representa un aspecto importante, ya que influye de manera significativa en el comportamiento y propiedades del concreto; el agua que se utiliza debe estar libre de impurezas, como son: grasas, aceites, azúcares, ácidos y materia vegetal, ya que estos impiden o retardan la hidratación. El agua utilizada es potable pero por las condiciones de ubicación de la obra puede requerirse el uso de otra fuente en cuyo caso, es obligatorio un control de sus componentes; en la Tabla 2.2, se

muestran las características químicas del agua para elaborar concreto (Torres, 2004).

**Tabla 2.2** Características químicas del agua para concreto (Torres, 2004)

CARACTERISTICA	VALOR LIMITE
pH	5 mín
Sustancia disueltas	15 máx
Sulfatos, $\text{SO}_4^{2-}$ , g/l	1 máx
Cloruros, $\text{Cl}^{1-}$ , g/l	6 máx.
Hidratos de Carbono	0
Sustancias orgánicas solubles	15 máx

La limitación de sulfatos se da como método de control a fenómenos expansivos futuros por la formación de etringita o yeso; los hidratos de carbono pueden, según su concentración, inhibir por completo el fraguado o acelerarlo en grado tal que impiden la utilización del material. Los efectos indeseables como consecuencia de la mala calidad del agua se reflejan en el concreto a corto, mediano y largo plazo. Los primeros corresponden a efectos negativos en el tiempo de fraguado y resistencias iniciales; a mediano plazo en las resistencias a edades superiores y los de largo plazo por el ataque de los sulfatos y reacción álcali-agregado (Chan *et. al.*, 2003).

### 2.2.3. Agregados

En las mezclas de concreto, los agregados representan entre el 60 y 75% del volumen absoluto de los componentes, de allí la importancia del conocimiento de sus características y propiedades. Gran parte de las características del concreto, tanto en estado plástico como endurecido, dependen de las características y propiedades de los agregados, las cuales deben ser estudiadas para obtener concretos de calidad y económicos. Los agregados bien graduados con mayor tamaño máximo tienen menos vacío que los de menor tamaño máximo;

por consiguiente, si el tamaño máximo de los agregados en una mezcla de concreto se aumenta, para un asentamiento dado, los contenidos de cemento y agua disminuirán. En general, el tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura (Torres, 2004).

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan, 1993).

### **2.2.3.1. Caracterización de agregados**

El concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, de pasta y agregados minerales. La pasta se compone de cemento y agua, que al endurecerse une a los agregados formando un conglomerado semejante a una roca debido a la reacción química entre estos componentes (Palbol, 1996).

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características ocurre también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen su efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan, 1993).

La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer en detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas de ellos, especialmente de los agregados (Ceron *et. al.*, 1996). El 100% de los concretos elaborados en México ocupan para su fabricación agregados que son obtenidos de dos fuentes: en



depósitos de origen natural (ríos, playas, etc.) y como productos de trituración de roca. Desde el punto de vista de su tamaño los agregados se dividen en dos grupos: los finos y los gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde los 5 mm hasta mayores de 60 micrómetros, los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta de 125 mm (Neville, 1999). Las propiedades físicas más importantes de los agregados son la absorción, la densidad aparente, la distribución granulométrica, el tamaño máximo de agregado para la grava, el modulo de finura para la arena, el peso volumétrico en estado suelto y compacto así como el contenido de agua, tanto para el comportamiento del concreto en estado plástico, como en su estado endurecido (Helene y Pereira, 2003).

a) Absorción: La absorción es la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen una absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla tales como tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción (Alaejos y Fernandez, 1996).

b) Densidad: Una propiedad de los agregados que resulta de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad ( $\geq 2.25$ ) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar el concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia determinada y con esto la influencia directa sobre la economía de la mezcla. La densidad aparente del

agregado depende del peso específico de los materiales que lo componen, así como de la cantidad de huecos que estos contengan (Ceron *et. al.*, 1996).

c) Distribución granulométrica: La granulometría y el tamaño máximo de agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, economía y durabilidad del concreto (Helene y Pereira, 2003).

*- Módulo de finura para la arena*

En el agregado fino hay un elemento que debe ser especialmente considerado que es el modulo de finura, este M.F es aceptable si esta en el rango de 2.2 a 3.1. Cuando el M.F es mayor a 3.1 se considera que la arena es gruesa y puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad. Por otro lado, cuando el M.F. es menor a 2.2 que se refiere a una arena fina, ocurre que los concretos son pastosos y hay menor consumo de cemento y agua para una resistencia determinada y la probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado (Uribe, 1991).

*-Tamaño máximo de agregado para la grava (TMA)*

Cuanto más grande es la partícula de agregado tanto menor es el área superficial para ser humedecida por masa unitaria. Así, al extender la granulometría del agregado a un tamaño máximo mayor se disminuye la cantidad de agua de la mezcla, de manera que para una trabajabilidad y un contenido de cemento especificados, la relación agua-cemento  $a/c$  se puede disminuir con un aumento consiguiente de su resistencia (Neville, 1999).

### **2.3. Porporcionamiento o diseño de la mezcla de concreto**

Proporcionar o diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar las cantidades relativas de materiales que hay que emplear en la mezcla para obtener un concreto adecuado para un uso determinado (Asocreto, 1997).

### **2.3.1. Diseño de la mezcla de concreto con aditivos**

La selección de las proporciones de los materiales integrantes de la unidad cúbica de concreto, es definida como el proceso que, en base a la aplicación técnica y práctica de los conocimientos científicos sobre sus componentes y la interacción entre ellos, permite lograr un material que satisfaga de la manera más eficiente y económico los requerimientos particulares del proyecto constructivo (Torres, 2004).

### **2.3.2. Curado de las muestras**

Curar el concreto es procurar que en su interior siempre existan condiciones de humedad y temperatura propicias para que todo el cemento que contiene alcance a hidratarse, ya que cualquier cantidad de cemento que no se hidrate dejará de contribuir al desarrollo de las propiedades del concreto. Tomando en cuenta que la completa hidratación puede requerir meses, e incluso años, resulta improbable disponer de agua interna en todo ese tiempo cuando la estructura opera en condición seca. Por tal motivo, se acostumbra especificar la resistencia de proyecto del concreto a una edad reducida, que normalmente es 28 días, considerando que la gran mayoría de su contenido de cemento del orden del 70 al 80% debe haberse hidratado a esa edad. Lo anterior presupone el compromiso de asegurar que no le falta agua interna al concreto durante sus primeros 28 días de edad. Para tratar de conseguirlo existen varios procedimientos, que en síntesis se agrupan en dos sistemas de curado húmedo: 1) aportación de agua al concreto desde el exterior a fin de reponer la que se pierde por evaporación y la que se consume por hidratación del cemento, y 2) un cubrimiento temporal de la superficie expuesta del concreto para evitar la pérdida por evaporación del agua interna, confiando que ésta sea suficiente para mantener la hidratación del cemento durante 3, 7, 14 y 28 días (Neville, 1999).

## **2.4. Durabilidad del concreto endurecido**

La durabilidad de un material está asociada con su vida en servicio bajo ciertas condiciones ambientales dadas. El ACI (Comité 201), define la durabilidad del concreto como: capacidad para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, es decir, un concreto durable retiene su forma original, calidad y servicio expuesto al medio ambiente (Ratay, 2000).

El material alcanza el final de su vida de servicio cuando sus propiedades se han deteriorado a tal punto que continuar utilizándolo se considera inseguro o antieconómico (Moreno *et. al.*, 2001). Según Hekal *et. al.*, 2002, el  $MgSO_4$  reacciona con los componentes químicos del cemento, incluyendo el C, S e H, de este modo se descompone el cemento y se forma consecuentemente el yeso y la etringita. Metha (2003), señala que en la mayoría de los casos la pérdida de adhesión y fuerza, en vez de la expansión y agrietamiento es la primera manifestación del ataque de los sulfatos.

### **2.4.1. Mecanismos de deterioro del concreto endurecido**

Los factores propios del material que contribuyen al fenómeno de deterioro en el concreto son entre otros: el tipo de cemento utilizado, las adiciones minerales, las características de los agregados y agua utilizada, la relación agua-cemento ( $a/c$ ), las condiciones de dosificación y preparación, y por último las condiciones de curado de la estructura. Las modificaciones en estas variables, además de controles de diseño y especificaciones del material, contribuyen a incrementar la durabilidad del producto final. Según la norma ASTM E-632, los diversos factores externos que afectan la durabilidad del concreto, se pueden clasificar como se indica en la Tabla 2.3. En general, los procesos conducen a una durabilidad del concreto inadecuada son múltiples y en cada caso están

relacionados con las características del elemento estructural en estudio, sus procesos de producción y colocación además de sus condiciones de servicio.

**Tabla 2.3** Factores de degradación del concreto (Torres, 2004)

<b>Agentes Atmosféricos</b>	Radiación (solar, térmica) Calor: elevadas o bajas temperaturas y ciclos térmicos Agua: Sólida (hielo-nieve); Líquida (lluvia y condensación) y vapor (humedad relativa) Aire: Gases, nieblas y partículas sólidas Congelación y deshielo; Viento.
<b>Factores Biológicos</b>	Microorganismos, fungicidas y bacterias.
<b>Factores de Carga</b>	Acción física del agua y viento, acciones combinadas.
<b>Factores Incompatibles</b>	Químicos y físicos.
<b>Factores de Servicio</b>	Diseño, instalaciones y procedimientos de mantenimiento, desgaste.

En un sólido poroso como el concreto, el agua es la causa de muchos procesos físicos de degradación y a su vez actúa como vehículo de transporte para iones agresivos, convirtiéndose en la fuente de procesos químicos de degradación. La propiedad que determina la facilidad de que el agua u otros fluidos penetren al interior del concreto es la permeabilidad. Esta propiedad se define por el tamaño, distribución y continuidad de los poros al interior del material (Mejía y Rodríguez, 1999).

## 2.5. Abrasión en el concreto endurecido

El Comité 210 del ACI (American Concrete Institute) define la erosión por abrasión como una desintegración progresiva de una estructura hidráulica debido al impacto y rozamiento de un cuerpo de mayor dureza que el concreto sobre la superficie del mismo. En las estructuras hidráulicas la abrasión es causada por el flujo de agua que transporta, arena, gravas y bloques subredondeados, lo que implica la pérdida paulatina de la superficie del concreto. Sin embargo, un

concreto de mayor durabilidad o desempeño es capaz de resistir velocidades elevadas de flujo por varios años sin alteraciones o pérdidas de su capa superficial, un concreto sin mayores cuidados puede perder desde pocos milímetros hasta varias decenas de centímetros, dependiendo de las condiciones de flujo (ACI Committee, 2000).

Una de las primeras aplicaciones de base de microsilica efectuadas en Estados Unidos fue en el depósito amortiguador del Dique Kinzua en Pennsylvania, que sufrió un severo deterioro por abrasión-erosión desde que se completó en 1967. Después de extensas investigaciones de laboratorio, en 1983, el Cuerpo de Ingenieros decidió usar concreto con base de microsilica para mejorar la durabilidad. En 1985, el Cuerpo de Ingenieros nuevamente escogió la microsilica para revestir interiormente el canal de la cuenca del río Los Angeles, un paso crítico que lleva el caudal estacional del río. Más recientemente, se ha utilizado en los diques de Mainey Kansas y se está sometiendo a ensayos en Oregon para los revestimientos internos de cierre de canales, para brindar una mayor resistencia a la abrasión-erosión (ACI, 1987).

## **2.6. Microscopia electrónica de barrido**

El microscopio electrónico de barrido (MEB) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores de la comunidad científica y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución ( $\sim 100 \text{ \AA}$ ), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras. El microscopio electrónico de barrido puede estar

equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas (Grageda y Montesinos, 2006).

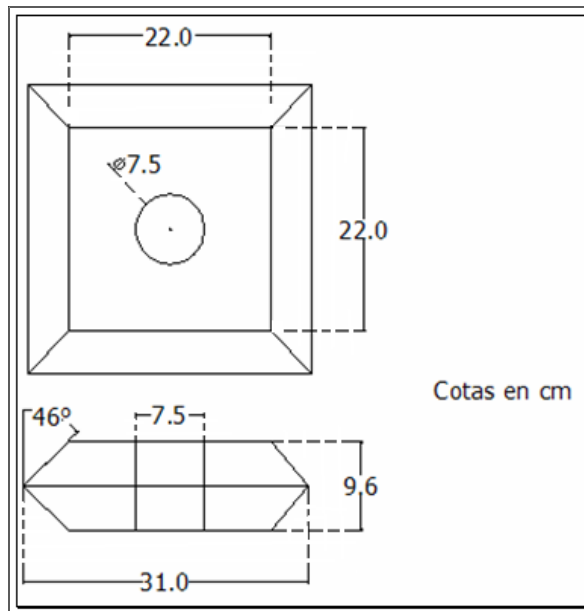
### III. METODOLOGIA

#### 3.1. Diseño geométrico

Partiendo de las ventajas que presentan los colchones o tapetes flexibles de concreto actuales utilizados para el control de erosión fluvial y estabilización de taludes, se mejoró el diseño de los bloques que lo componen realizando un agujero en su centro de diámetro de 7.5 cm, que permitiera el crecimiento de vegetación ribereña y de esta manera incrementar la estabilización de los taludes.

La geometría de dichos bloques permite el movimiento y flexibilidad de los mismos, permitiendo su adaptación a laderas con problemática de remoción en masa y canales con pérdida de sedimentos. El ángulo de  $46^{\circ}$  es el parámetro que propicia la flexibilidad hasta el punto de poderse enrollar para transportarlo e instalarlo con facilidad. El molde para realizar el bloque prototipo a escala real, se diseñó en madera con las medidas que se indican en la Figura 3.1, para estos también se determinó peso y volumen, para estimar los parámetros de un colchón flexible con determinado número de bloques que unidos por un cable copolímero permita el fácil transporte y acomodo en laderas, orilla de río o taludes con problemática de erosión. El molde fue engrasado para evitar que se pegara la mezcla, se dejó fraguar por 24 horas y se desmoldó.





**Figura 3.1.** Dimensiones del bloque

### 3.2. Proporcionamiento de mezclas de concreto y elaboración de las muestras cilíndricas

Para determinar parámetros como la resistencia a la compresión simple, el módulo de elasticidad, la absorción y el comportamiento de la resistencia a la compresión simple y para corroborar la efectividad del aditivo utilizado, se elaboraron muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro \* 20 cm de altura para realizar cada una de las pruebas mencionadas. Las muestras cilíndricas fueron elaboradas con los agregados caracterizados. A continuación se describe detalladamente cada uno de los ensayos llevados a cabo.

#### 3.2.1. Caracterización de agregados

La caracterización de los agregados pétreos que componen la mezcla de concreto según las normas técnicas internacionales *American Society of Testing Materials*, ASTM, se requirió para el diseño de la mezcla (proporcionamiento), cumpliendo con las especificaciones de la *American Concrete Institute*, ACI en su comité 211.1. Las propiedades obtenidas para la grava y la arena fueron la

absorción, densidad, distribución granulométrica con modulo de finura para la arena y tamaño máximo de agregado para la grava, peso volumétrico en estado suelto y compacto y finalmente el contenido de agua o humedad. A continuación se describen los procedimientos para obtener cada una de las propiedades mencionadas.

#### **a) Absorción de los agregados**

Para obtener el porcentaje de absorción de la grava y la arena, fue necesario restar el peso seco del inicial sobre el peso seco. Este procedimiento es el que indica la norma técnica internacional ASTM C127 *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate* y ASTM C128 *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*.

$$Absorción = \frac{W_i - W_{sec\ o}}{W_{sec\ o}} * 100$$

#### **b) Densidad de los agregados**

La relación de masa-volumen de la arena se determino mediante la utilización del matraz calibrado, este se peso con agua hasta el aforo, y otro matraz se peso con arena que fue evaporada en la estufa confirmando su estado saturado superficialmente seco (sss), con el cono de cobre y un pison. Esta condición se alcanza evaporando la arena en la estufa en una charola moviéndola continuamente con una espátula, la condición final se alcanza cuando el agregado fino se deposita en la parte angosta superior del cono y dejando caer el pison, creando una compactación tal que, cuando se quite el cono, la arena no se colapsara. La arena que se utilizo en esta prueba siempre estuvo en condición "sss". Esta prueba se realizó según la norma internacional ASTM C127 *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of*

*Coarse Aggregate y C128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.*

$$Densidad = \frac{W_{sec\ o}}{[W_{sec\ o} + (W_{matraz} + agua)] - (W_{matraz} + W_{sss} + agua)}$$

### **c) Distribución granulométrica de arena y grava**

El ensayo de la granulometría se efectuó de forma similar para los agregados, solo difiere el número de aberturas de cada tamiz, teniendo aberturas menores el material que pasa la malla número 4, que generalmente marca la frontera dividiendo material grueso de material fino. La prueba se realizó como lo indica la norma internacional ASTM C136 *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Para la grava los tamices utilizados fueron 1", ¾", ½", 3/8", No. 4. Las mallas se acomodaron en este orden y la muestra de agregados con peso conocido se colocó en la primera, se empezó a mover para que pasara o se quedaba material en las aberturas. Los pesos retenidos se ingresan en la tabla de composición granulométrica en la cual se calculan también el porcentaje de retenidos parcial, el acumulado y el porcentaje que pasa. Estos datos fueron útiles para definir el tamaño máximo de agregado, TMA que solo se calcula para el material grueso. Para la arena se utilizaron tamices de aberturas menores como son la número 8, 16, 30, 50, 100, 200, y se procedió como se indicó anteriormente para la grava, los datos obtenidos para la composición granulométrica de la arena se utilizaron para calcular el módulo de finura MF, que solo se halla para este material.

$$M.F = \frac{\sum \% Retenidoparcial}{100}$$

#### d) **Peso volumétrico en estado suelto y compacto de agregados**

Este ensayo se realizó para complementar la información requerida para el proporcionamiento y diseño de la mezcla, la arena fue cuarteada con una regla de madera en el piso después de haberla depositado en forma de cono con una cubeta. En un recipiente de volumen y peso conocidos, se colocó el material extraído del cuarteo de las zonas opuestas, para el compacto se colocaron tres capas siendo cada una varillada por 25 veces, y para el peso volumétrico suelto no se hizo este procedimiento. Las ecuaciones con las que se calculó este parámetro son las siguientes:

$$P_{vs} = \frac{W_{agregado}(kg)}{Vol.molde(lt)} * 1000$$

$$P_{vc} = \frac{W_{agregado}(kg)}{Vol.molde(lt)} * 1000$$

#### **3.2.2. Proporcionamiento o diseño de la mezclas de concreto endurecido**

Para evaluar el comportamiento de las mezclas propuestas según las especificaciones del comité 211.1 de la *American Concrete Institute (ACI)*, fue necesario elaborar muestras cilíndricas en concreto de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, los cuales deben cumplir especificaciones de la norma internacional ASTM C 192, *Making and curing concrete test specimens in the laboratory*, y de esta manera determinar la mezcla óptima que proporcionará la resistencia máxima a la compresión simple y menor permeabilidad a los agentes agresivos. La resistencia a la compresión ( $f'c$ ) para la cual se realizó el proporcionamiento o diseño de la mezcla fue de 250 kg/cm<sup>2</sup>, dicha resistencia fue tomada como referencia de los tapetes ecológicos consultados en la revisión bibliográfica.

Se propuso la utilización de aditivos, para realizar la comparación entre las tres mezclas, la primera es simple o control (agregados pétreos, cemento y agua), la segunda en iguales proporciones con una adición de fibra polipropileno para refuerzo secundario del concreto marca Sika y la tercera buscando

impermeabilizar el concreto con una adición de base en microsílica para concretos y morteros de alta durabilidad y desempeño, de la marca Sika. Ver Figura 3.2.



**Figura 3.2** Mezcla simple para elaboración de muestras

#### Elaboración de muestras de concreto endurecido

En la elaboración de las muestras para las pruebas de resistencia a la compresión, la mezcla se depositó en dos capas sucesivas con un cucharón en los moldes de lamina metálica gruesa y no absorbente, después de cada capa se golpeó 25 veces uniformemente en la sección transversal con una varilla de tamaño y diámetro (10 mm) especificados en la norma ASTM C192 dentro del molde para asegurar que se acomodara la mezcla de concreto y no quedaran poros de aire, adicionalmente se dieron golpes por fuera del molde con un mazo de hule para seguir desalojando aire. Los moldes deben tener una base metálica maquinada según lo dice la norma ASTM C192. Ver Figura 3.3. Finalmente se enrasaron y taparon con bolsas húmedas para evitar evaporación y se dejan por no menos de 20 horas ni más de 48 horas, al cumplirse este tiempo se desmoldaron y se llevaron a un contenedor lleno de agua a curar por 3, 7, 14 y 28 días que son las edades en que se revisa la resistencia máxima a la compresión simple de cada mezcla. Lo anterior según la norma ASTM C192-02 *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*.



**Figura 3.3** Elaboración de muestras de concreto endurecido

### **3.2.2.1. Proporcionamiento de la mezcla de concreto con sikacrete-950 DP**

Este aditivo es una base de microsilica que se utilizó en la fabricación de la mezcla de concreto según especificaciones técnicas de Sika, buscando durabilidad, desempeño y disminuir la permeabilidad del mismo, y con ello su resistencia al ataque del medio expuesto y principalmente su constante contacto con el agua, que contiene sulfatos que deterioran su estructura interna. Según la dosificación de la ficha técnica de este producto se aplica en porcentajes del 5 al 15%, por lo cual se eligió trabajar con la media, es decir, un 10% del peso del cemento, de acuerdo a la resistencia del concreto  $f'c$  esperada. Ver Figura 3.4.



**Figura 3.4** Adición de sikacrete 950-DP

### 3.2.2.2. Proporcionamiento de la mezcla de concreto con sikafiber

Este aditivo es una fibra de polipropileno, funciona según las especificaciones de Sika, actuando en la mezcla como refuerzo secundario en concretos y morteros, así como reducir los agrietamientos por contracción plástica en estado fresco y por temperatura en estado endurecido.

La ficha técnica de este aditivo indica que su dosificación es 600 gramos por metro cúbico de concreto (Figura 3.5), en este caso se utilizaron 5 gramos, ya que el volumen es  $0.007853 \text{ m}^3$  para la elaboración de cinco muestras por cada edad de curado evaluada.



**Figura 3.5** Adición de sikafiber

### 3.2.3. Curado de muestras

El número de muestras cilíndricas elaboradas por cada mezcla para las pruebas de resistencia a la compresión simple y absorción fue de 20, teniendo en cuenta las edades a las que se evalúan las propiedades en cuanto a resistencia a la compresión simple del concreto endurecido (3, 7, 14 y 28 días), contando para cada edad de curado con cuatro repeticiones para obtener datos suficientes para el análisis estadístico.

Las muestras fueron sumergidas en una cubeta con agua para que se diera la hidratación del cemento y fueron sacados de allí en las edades mencionadas.

### **3.3. Propiedad mecánica: resistencia a la compresión simple**

Una vez cumplida cada una de la edades, las muestras fueron sacadas de la cubeta con agua y fueron llevadas a cabecear con mortero azufre en los cabezales dispuestos para este proceso, se calentó el azufre en la estufa y se deposito cuando estaba fluido en la base de 10 cm, la muestra cilíndrica previamente engrasado se colocó para que el azufre se seicara con la cara de la muestra hacia arriba, se debió realizar este procedimiento para ambas caras.

La prueba de resistencia a la compresión simple se realizó en la máquina universal donde se colocó la muestra previamente cabeceada con mortero de azufre; la carga fue controlada por el laboratorista, previamente las muestras también fueron medidas en su altura y diámetro con el vernier para precisar los datos de cada muestra, la carga aplicada es en kilogramos. Una vez alcanzada la resistencia máxima, es decir, en la cual la muestra presentó la falla se retiró de la máquina y se prosiguió con los demás. La carga aplicada fue monitoreada con el micrómetro para calcular el módulo de elasticidad posteriormente.

### **3.4. Propiedades físicas**

La absorción es la propiedad del concreto de poseer una baja permeabilidad a los fluidos; es una condición necesaria para el buen desempeño y durabilidad de las estructuras; esta propiedad se evalúa bajo el criterio de la norma ASTM C 642, que permite determinar la densidad, el porcentaje de absorción y el porcentaje de porosidad o vacíos en el concreto endurecido. La porosidad del concreto se considera como los espacios vacíos que quedan en la masa del concreto a consecuencia de la evaporación del agua excedente al mezclarse, y al aire atrapado durante su fabricación. La absorción se define como

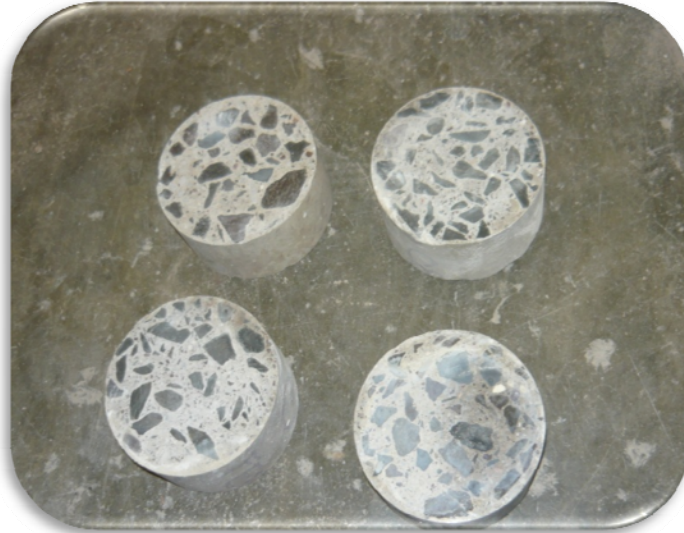


el incremento en porcentaje respecto a la masa seca inicial de un material sólido como resultado de la penetración de agua en sus poros permeables hasta llenarlos (ASTM C 125).

Según la norma ASTM C642 *Standard Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concret*, las muestras que se utilizaron es esta prueba median menos de 350 cm<sup>3</sup>, lo cual se obtuvo cortando las muestras de concreto endurecido de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, en cuatro partes iguales en la máquina cortadora de concreto (Figura 3.6 y 3.7); se llevaron al horno a una temperatura de 100 °C por espacio de 48 horas, tiempo en el cual se registró su peso seco. Después de obtener este peso se sumergió por un periodo de 48 horas y se registro el peso sumergido de las cuatro porciones de la muestra cilíndrica. Al cabo de este tiempo se hirvieron por espacio de 5 horas y se dejaron enfriar en el mismo recipiente en que fueron hervidos, por 14 horas más; después se tomó el peso después de ebullición y saturado. Para terminar se registro el peso sumergido en la balanza de precisión y se efectuaron los cálculos correspondientes a la norma citada al inicio.



**Figura 3.6** Máquina cortadora de concreto endurecido



**Figura 3.7** Secciones de muestra cilíndrica para prueba de absorción

Las pruebas mencionadas a continuación se realizaron a una muestra cilíndrica de concreto de cada mezcla por cada edad, obteniéndose un total de 12:

- Absorción después de inmersión
- Absorción después de inmersión y ebullición. Absorción total
- Densidad después de inmersión
- Densidad después de inmersión y ebullición
- Densidad aparente
- Volumen de vacíos

### **3.5. Pruebas de durabilidad**

La impermeabilidad de la pasta de cemento es una característica muy apreciada, pues se asume que esto resultará en un concreto impermeable y, por lo tanto durable, es decir, debe mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto al medio ambiente. El agente agresivo presente forma natural en suelo y agua que afecta de manera drástica al concreto es el sulfato y en mayor magnitud el sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ), el cual ingresa a la microestructura del concreto causando expansión, agrietamiento y deterioro.

Por lo anterior, se escogió sulfato de magnesio para simular las condiciones extremas de exposición de la mezcla seleccionada.

Esta prueba se realizó con base en la norma ASTM C88, *Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate*, que establece una concentración de 1230 gramos de sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ) por litro, las muestras se sumergieron por mínimo 16 horas o máximo 18 horas. En este caso se sumergieron por 17 horas, tiempo en el cual el recipiente donde se alojaban estuvo cubierto para evitar la evaporación de la solución. Cumplidas las 17 horas, la muestra fue extraída por 10 minutos y sin otro secado se llevó al horno por 4 horas, obteniendo su peso a las 2, 3 y 4 horas respectivamente para monitorear la pérdida de masa. Los procedimientos anteriores comprenden un ciclo, y la norma señala la repetición mínima de 3 ciclos y máxima de cinco, en este caso se realizaron cinco ciclos de humedecimiento y secado.

Terminado el quinto ciclo, se procedió a cabecear con azufre los cilindros para la prueba de resistencia a la compresión simple y evaluar el comportamiento y variación de esta después del ataque con el sulfato de magnesio. Bassuoni y Nehdi, 2009, afirman que la prueba clásica de inmersión del sulfato para el concreto endurecido presenta a menudo un comportamiento diferente al observado en la exposición verdadera de campo. Tales pruebas no consideran otros parámetros que existen en servicio que puede afectar los mecanismos y la cinética de ataque de sulfato de magnesio.

### **3.6. Análisis complementario**

#### **3.6.1. Microscopia electrónica de barrido**

Como complemento de las propiedades obtenidas para cada una de las mezclas propuestas, se realizó caracterización por la técnica de microscopia electrónica de barrido. Las muestras debieron ser preparadas antes de ser

montadas y analizadas en el microscopio marca JEOL modelo JSM-6060LV con sistema de microanálisis por EDS marca Oxford.

El equipo consta de una columna, paneles de control, dos bombas mecánicas de vacío, una bomba de difusión y un detector de EDS (Energy Dispersión Spectroscopy). Está conectado a un UPS propio para garantizar una continua y sostenida corriente eléctrica. Cuenta con un sistema de enfriamiento por aire. (Water Chiller, Air Cooler 950 W) que proporciona las condiciones de temperatura interna del equipo. Requiere trabajar a temperatura ambiente de 20<sup>0</sup>C. Puede trabajar hasta 30 kV y ampliaciones hasta 400 mil, detectar de manera cualitativa y semi-cuantitativa elementos de número atómico mayor al Berilio, con un límite de detección de 0.1% en peso.

Los fragmentos de cada muestra debían ser menores a 1 cm de ancho por menos de 5 mm de alto, estos fueron pegados por medio de una cinta de carbono en el porta muestras de aluminio de 2,54 cm de diámetro. Este último fue debidamente lustrado con pomada limpia metales y luego fue embebido en acetona y llevado al sonizador por 10 minutos para liberar la grasa adquirida con el brilla metales. Una vez fijadas y etiquetadas las muestras en los porta muestras se llevaron al evaporador de metales para ser recubiertas con oro. Cada ciclo de recubrimiento con oro tuvo una duración de 4 minutos, y este tuvo como objetivo obtener una superficie homogénea y conductora. Una vez montadas las muestras en el microscopio, el laboratorista cerraba el microscopio herméticamente, e iniciaba el vacío para enfocar la muestra y tomar las imágenes. Cada muestra fue evaluada a 3, 7, 14 y 28 días para corroborar su estructura en los tiempos de curado, cada una de las muestras fue captada con ampliaciones de 15x, 100x, 200x, 500x y 1000x.

### **3.6.2. Análisis estadístico**

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de propiedades mecánicas y físicas de las mezclas propuestas, se realizó un análisis estadístico con el objetivo de determinar la diferencia que existe entre cada una de ellas y seleccionar la mezcla de concreto que presentara un óptimo desempeño de acuerdo a sus resultados en contacto con agentes agresivos presentes de forma natural en el suelo y su resistencia a la compresión simple. Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el programa Statgraphics, con el cual se realizaron análisis de varianza (anova), comparación de medias y la desviación estándar, al igual que se calcularon diferentes medidas de dispersión. Con los resultados obtenidos y haciendo uso del estadístico F se determinó la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de las diferentes mezclas, con un porcentaje de confiabilidad determinado y con el fin de estimar la homogeneidad de los resultados por mezclas, se aplicó una prueba de rangos múltiples.

### **3.6.3. Evaluación hidráulica de un bloque constitutivo del colchón**

La evaluación hidráulica se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Para realizar esta evaluación se utilizó un bloque constitutivo del colchón flexible, diferentes superficies de contacto, diferentes gastos y el canal de pendiente variable.

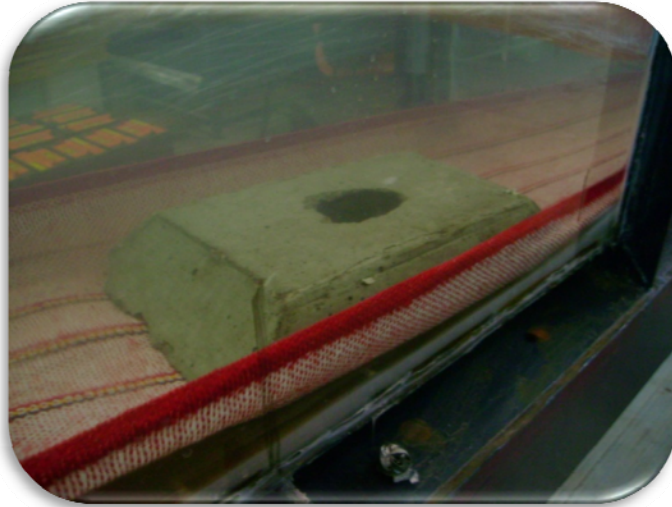
Para cada superficie se inicio con una pendiente de 0% y un caudal de 0.05 m<sup>3</sup>/s, el cual fue aumentando de manera gradual hasta un caudal máximo de 0.15 m<sup>3</sup>/s verificando si el bloque cambiaba de posición por efecto del gasto.



**Figura 3.8.** Superficie de acrílico del canal de pendiente variable.

En los casos en que aplicando el caudal máximo el bloque permaneciera en su posición inicial se procedió a cambiar la pendiente a 1%, y se inició con la evaluación desde el caudal mínimo hasta el caudal máximo. La pendiente se modificó hasta el tope máximo del canal (2%) en los casos en que la pendiente del 1% y el caudal máximo no ejercieron ningún cambio de posición a la unidad.

Las superficies utilizadas para realizar la evaluación se seleccionaron con el fin de obtener diferentes rugosidades. La primera superficie utilizada fue la original del fondo del canal, el cual está construido con acrílico (ver Figura 3.8). El segundo material usado fue tela de uso rudo (jerga), la cual a simple vista posee una rugosidad diferente al acrílico usado anteriormente (ver Figura 3.9). Finalmente el tercer material utilizado fue un material tipo tapete antideslizante, el cual posee una rugosidad intermedia entre el acrílico y la jerga (ver Figura 3.10).



**Figura 3.9.** Superficie de tela de uso rudo (jerga).

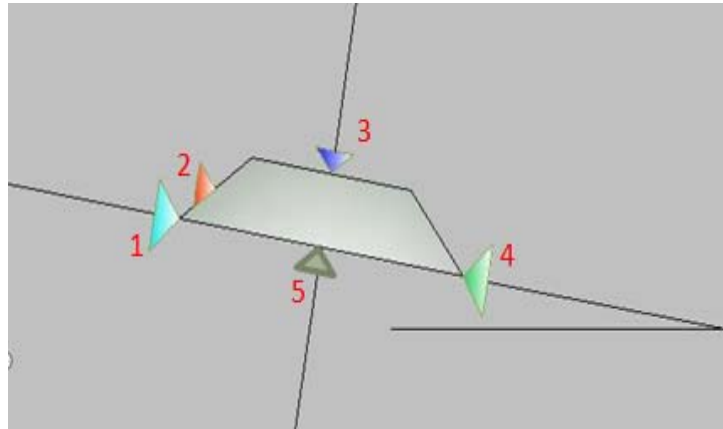
Para cada caudal aplicado a cada material en cada pendiente, se determinó la altura de la sección y, por medio de un micro molinete, se midió la velocidad promedio en la sección medida. Una vez obtenidos los datos de la sección y la velocidad se calculó el caudal y el coeficiente de rugosidad de Manning para cada superficie.



**Figura 3.10.** Superficie de tapete antideslizante.

Para que la unidad permanezca estable la sumatoria de fuerzas deben ser igual a cero tanto para el eje x como para el eje y. El diagrama de fuerzas que

representa el movimiento o falla de la unidad en una superficie cualquiera se relaciona en el eje x con las fuerzas de rozamiento y deslizamiento, y, en el eje y, con la fuerza normal y el peso. En la Figura 3.11 se representa el diagrama de fuerzas que se involucran en la estabilidad de un bloque en una superficie dada.



**Figura 3.11.** Diagrama de fuerzas.

Donde,

$F_e$  = Fuerza de empuje del agua

$\tau$  = Esfuerzo cortante

$W$  = Peso

$F_r$  = Fuerza de fricción

$N$  = Normal

Los resultados obtenidos y la discusión se presentan en el capítulo IV.

La Tercera Ley de Newton dice que toda fuerza de acción sobre un cuerpo tiene una fuerza de reacción con la misma magnitud, en la misma dirección y en sentido opuesto. Por lo tanto como el peso es una fuerza, si el objeto está sobre una superficie, existirá una fuerza de reacción. A esta fuerza perpendicular a la superficie y opuesta al peso se le llama fuerza normal. La fuerza normal de una superficie horizontal plana sobre un objeto que empujado con una fuerza horizontal siempre será de igual magnitud al peso pero con dirección opuesta.



La fuerza de cortante o esfuerzo cortante es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico como por ejemplo una viga o un pilar, en este caso el bloque.

Fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto: fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática). Esta fuerza resultante se compone de la fuerza normal (perpendicular a las superficies en contacto) y de la fuerza de rozamiento, paralela a las superficies en contacto.



agregados para elaborar las muestras cilíndricas que se ensayaron a compresión simple. A continuación se muestran los resultados tanto de los áridos como de las pruebas de resistencia para las cuatro edades de curado evaluadas para las tres mezclas.

Las propiedades obtenidas de la grava y la arena se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 4.1** Datos de absorción para los agregados

<b>Agregado Pétreo</b>	<b>Arena</b>	<b>Grava</b>
<b>Absorción (%)</b>	2.56	2
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.57	2.64
<b>Peso Volumétrico Suelto (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.32	1.43
<b>Peso Volumétrico Compacto (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.37	1.54
<b>Humedad (%)</b>	1.72	1

**Tabla 4.2** Composición granulométrica de la arena

<b>Malla No</b>	<b>Peso Retenido Parcial (g)</b>	<b>% Retenido Parcial</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% que pasa</b>
8	97.6	5	5	95
16	380.1	19	24	76
30	1197.2	60	84	16
50	192.7	10	94	6
100	106.1	5	99	1
200	15.5	1	100	-
Suma	1989.2	100	-	-
Charola	4.8	-	-	-
Suma	1994	-	-	-

El modulo de finura, MF solo se calcula para la arena, y su valor fue 3.1

**Tabla 4.3** Composición granulométrica de la grava

<b>Malla No</b>	<b>Peso Retenido Parcial (g)</b>	<b>% Retenido Parcial</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% que pasa</b>
1"	0	0	0	100
3/4"	408.5	20	20	80
1/2"	933.3	47	67	33
3/8"	471.8	24	91	9
No. 4	175.2	9	100	0
Pasa No. 4	7.2	0.4	100.4	-
Suma	1996	100.4	-	-

El tamaño máximo de agregado, TMA, solo se obtiene para la grava, y fue de 25 mm.

En la Tabla 4.4, se menciona el número de muestras cilíndricas para cada mezcla a ser evaluada en las diferentes edades de curado que son 3, 7, 14 y 28 días, teniendo un total de 20 muestras por mezcla, es decir, 60 muestras en total para las 3 mezclas.

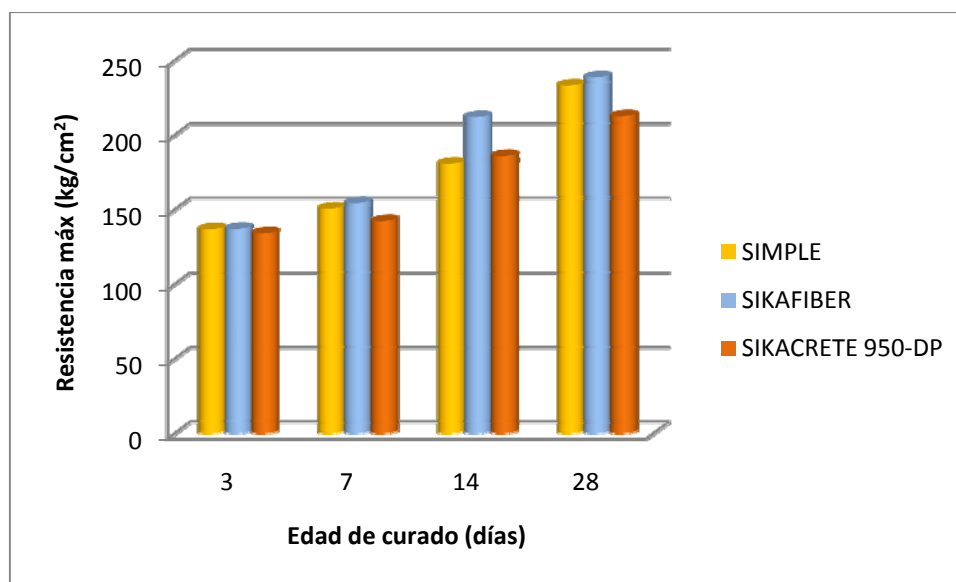
**Tabla 4.4** Número de muestras por mezcla

<b>Número de muestras</b>	<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Relación agua/cemento</b>
20	Simple	0.6
20	Sikacrete 950-DP	0.6
20	Sikafiber	0.6

### **4.3. Resistencia a la compresión simple**

A continuación en la Figura 4.2, se muestran las resistencias máximas de compresión simple medias obtenidas a las edades de curado de 3, 7, 14 y 28 días para cada una de las mezclas de concreto endurecido (simple, sikacrete 950-DP, sikafiber), notándose como máxima la resistencia de la mezcla adicionada con la

fibra de polipropileno (sikafiber). La mezcla con sikacrete 950-DP reportó una resistencia menor a la mezcla simple y con fibra de polipropileno (sikafiber), esto debido a las características que se nombran en su ficha técnica, es decir, la finalidad de este aditivo es la impermeabilización del concreto y no permitir el ingreso de los sulfatos.



**Figura 4.2.** Gráfica de resistencia máxima a la compresión simple de las mezclas

Las pruebas de resistencia a la compresión simple se realizaron adicionalmente con un micrómetro que permitiera reportar la deformación unitaria vertical de cada muestra, la carga aplicada fue constante de 500 kg, este fue el intervalo utilizado para tomar dicho dato. El módulo de elasticidad (Tabla 4.5), permite determinar que tan rígido o elástico es el material analizado mediante las lecturas del micrómetro y posterior elaboración de la curva donde se halló la pendiente de la misma.

**Tabla 4.5.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 28 días

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$1,02 * 10^5$
Sikacrete 950-DP	$1,03 * 10^5$
Sikafiber	$8.82 * 10^4$

En la Tabla 4.5, se observan los resultados obtenidos antes del ataque con sulfato de magnesio, la mezcla que presentó el menor módulo de elasticidad fue la de fibra de polipropileno o sikafiber, es decir, posee una microestructura más rígida que las otras dos mezclas, esto puede ser debido a la conexión y enlace mecánico que generan dichas fibras. La mezcla simple y la de sikacrete 950-DP o microsíllica obtuvo un valor similar a la mezcla simple.

#### 4.3.1. Análisis estadístico de los resultados antes del ataque con $MgSO_4$

A continuación se presenta el análisis estadístico realizado, utilizando el software Statgraphics, con el cual se calculó la desviación estándar, la media, el análisis de la varianza, la comparación de medias y la prueba de rangos múltiples.

**Tabla 4.6.** Resumen estadístico de resultados de compresión simple.

<b>Mezcla</b>	<b>Media (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Simple</b>	233.29	9.60
<b>Sikacrete 950-DP</b>	212.72	2.42
<b>Sikafiber</b>	238.68	11.44

Utilizando los resultados de los cinco muestras para cada edad y mezcla, se calculó la media y la desviación estándar de los resultados de compresión simple en cada una (ver Tabla 4.6). Para el caso de los valores de la media los resultados fueron los esperados ya que para el caso de la mezcla sikafiber se obtuvo el valor mayor con 238.68 kg/cm<sup>2</sup>, esto debido a que este aditivo se utiliza como refuerzo secundario a la compresión simple; en el caso de la mezcla simple el valor fue de 233.29 kg/cm<sup>2</sup>, y finalmente, la mezcla sikacrete 950-DP obtuvo un valor menor con respecto a las otras dos mezclas con 212.72 kg/cm<sup>2</sup>, esto debido a que este aditivo se utiliza para mejorar la durabilidad del concreto ante el ataque de sustancias agresivas y no para reforzar la resistencia a la compresión simple.

Los resultados obtenidos de la desviación estándar demuestran que los valores de la mezcla sikafiber se encuentran con una dispersión mayor con respecto a las otras dos mezclas, con un valor de 11.44, seguido por la mezcla simple con un valor de 9.60 y finalmente los resultados menos dispersos son para la mezcla sikacrete 950-DP con un valor de 2.42.

**Tabla 4.7.** Tabla ANOVA

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>GI</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Entre grupos</b>	1618.91	2	809.457	9.78	0.0036
<b>Dentro de grupos</b>	910.675	11	82.7886	-	-
<b>Total (Corr.)</b>	2529.59	13	-	-	-

El análisis de varianza (ANOVA), realiza el análisis mediante la construcción de una tabla que descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. Utilizando esta tabla se calculó el estadístico F, que en este caso fue de 9.78, el cual es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Utilizando el valor obtenido del estadístico F se calculo el valor de P, obteniendo como resultado 0.0036 valor que es menor que 0.05, lo cual indico que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel de confiabilidad del 95.0% (Tabla 4.7). La prueba de P, solo indicó la existencia de diferencia estadísticamente significativa, mas no indico entre que grupos de datos se da esta diferencia, por lo cual se llevó a cabo una prueba de rangos múltiples (ver Tabla 5.8)

**Tabla 4.8.** Prueba de rangos múltiples.

<b>Mezcla</b>	<b>Casos</b>	<b>Media (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
<b>Simple</b>	5	233.29	X
<b>Sikacrete 950-DP</b>	5	212.72	X
<b>Sikafiber</b>	5	238.68	X

<b>Contraste</b>	<b>Sig.</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>
<b>Sikacrete 950DP - Sikafiber</b>	*	-25.9575	13.4341
<b>Sikacrete 950-DP - Simple</b>	*	-20.5715	13.4341
<b>Sikafiber - Simple</b>		5.386	12.6658

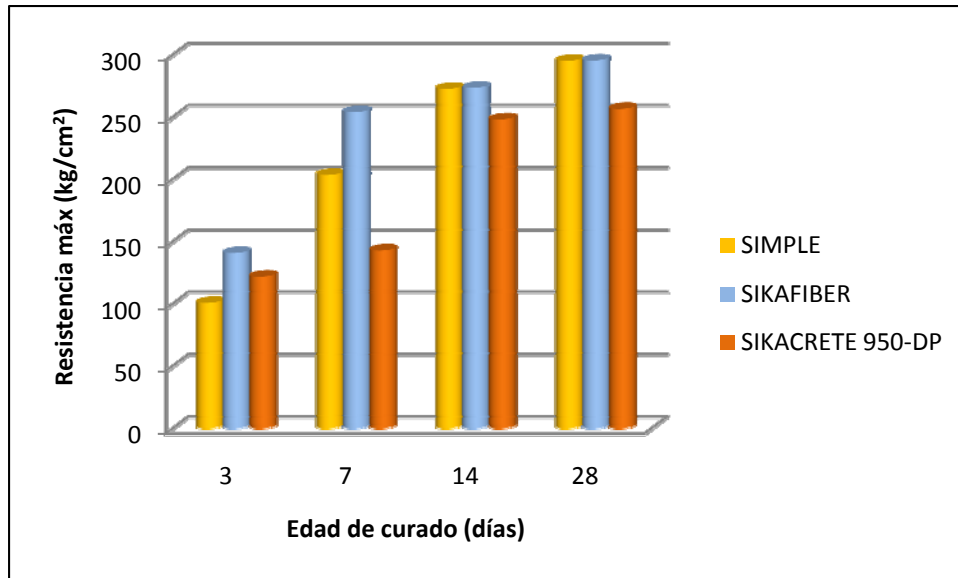
Esta prueba, realiza un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. En la parte superior de la Tabla 4.8, se observan los grupos homogéneos de resultados, obteniendo que la mezcla simple y la mezcla con sikafiber se encuentran en un grupo y la mezcla sikacrete 950-DP se encuentra en otro. En la parte inferior de la Tabla 5.8, se observa la existencia de diferencia estadísticamente significativa con un nivel del 95.0% de confianza de la comparación de pares de mezclas, esta diferencia se simboliza con un asterisco (\*), al igual en la tabla se observa una diferencia numérica entre cada comparación y el cálculo de límites. Los resultados mostrados en la Tabla 4.8, están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, y están contruidos de tal manera que si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95.0% de las veces.

#### **4.4. Resistencia a la compresión simple después del ataque de MgSO<sub>4</sub>**

En la Figura 4.3, se muestran los valores obtenidos para las tres mezclas a las cuatro edades de curado evaluadas de 3, 7, 14 y 28 días, de nuevo los resultados de resistencia máxima son similares para las mezclas simple y sikafiber con valores de 280 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente, mientras que la mezcla con base de microsíllica o sikacrete 950-DP reportó una resistencia máxima a la compresión a los 28 días de 250 kg/cm<sup>2</sup>.

Cabe recordar que este aditivo funciona como protección del concreto ante los agentes agresivos y la abrasión, contrario de la mezcla con sikafiber que actúa como refuerzo secundario para la resistencia de las mezclas.





**Figura 4.3** Gráfica de resistencia máxima a la compresión simple de las mezclas expuestas a  $MgSO_4$

A continuación se presentan los valores del módulo de elasticidad obtenido para cada mezcla a 28 días de curado en la Tabla 4.9. Los módulos para cada una de las edades evaluadas se encuentran en el apéndice, al final de este documento.

**Tabla 4.9** Módulo de elasticidad de las mezclas a 28 días, expuestas a  $MgSO_4$

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$1,2 * 10^5$
Sikacrete 950-DP	$8,82 * 10^4$
Sikafiber	$1,07 * 10^5$

En la Tabla anterior, se destaca el valor obtenido por la mezcla con sikacrete 950-DP (base de microsíllica), esto indica que la estructura interna del concreto esta rígida, lo cual favorece el bloqueo de los agentes agresivos que quieran ingresar a éste. El valor intermedio es el de la mezcla con fibras de polipropileno gracias al enlace mecánica que se genera con este aditivo, finalmente se encuentra la mezcla simple o control que presenta la estructura más elástica a los 28 días.

#### 4.4.1. Análisis estadístico de los resultados con las mezclas atacadas con $MgSO_4$

En la Tabla 4.10, se presenta el análisis estadístico realizado, utilizando el software Statgraphics, con el fin de determinar la desviación estándar, la media, el análisis de la varianza, la comparación de medias y la prueba de rangos múltiples para la prueba de resistencia a la compresión simple de las mezclas propuestas.

**Tabla 4.10.** Resumen estadístico de resultados de compresión simple, después del ataque con  $MgSO_4$

Mezcla	Media ( $kg/cm^2$ )	Desviación Estándar
Simple	294.938	9.23
Sikacrete 950-DP	256.352	5.72
Sikafiber	295.22	6.78

Los resultados obtenidos de las muestras probadas a compresión simple se utilizaron para calcular el promedio y la desviación estándar de cada mezcla. En la Tabla 4.10 se presenta el resumen estadístico con los datos mencionados para la edad de curado de 28 días. La mezcla que presentó la máxima resistencia a la compresión simple fue la simple o control con  $294.9 kg/cm^2$ , seguida por la mezcla con sikafiber con  $295.2 kg/cm^2$ . Por último la mezcla con sikacrete 950-DP (base de microsíllica), obtuvo un valor bajo con respecto a los valores descritos anteriormente. Comparando valores de las medias de las mezclas antes y después de la exposición al sulfato de magnesio en la edad de 28 días, se observa que; la mezcla simple y la de fibra de polipropileno tuvieron un aumento del orden de 2 MPa aproximadamente, y que para la mezcla con sikacrete 950-DP un descenso despreciable en cuanto a resistencia.

Para la desviación estándar los resultados obtenidos demuestran que los valores de la mezcla con sikacrete 950-DP se encuentran con una dispersión mayor con respecto a las otras dos mezclas, con un valor de 9.72, seguido por la

mezcla con sikafiber con un valor de 6.78 y finalmente los resultados menos dispersos son para la mezcla simple con un valor de 5.23.

El análisis de varianza (ANOVA), realiza el análisis mediante la construcción de una tabla que descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. Ver Tabla 4.11.

**Tabla 4.11** Tabla ANOVA de compresión simple después del ataque con  $MgSO_4$

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>GI</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Entre grupos</b>	4149.95	2	2074.97	39.07	0.0000
<b>Dentro de grupos</b>	531.13	10	53.113	-	-
<b>Total (Corr.)</b>	4681.08	12	-	-	-

Utilizando la Tabla 5.10 se calculó el estadístico F, que en este caso fue de 39.07, el cual es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Utilizando el valor obtenido del estadístico F se calculó el valor de P, obteniendo como resultado 0.0000 valor que es menor que 0.05, lo cual indicó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables estudiadas con un nivel de confiabilidad del 95.0% (Ver Tabla 4.11). Para establecer entre cuales mezclas se dió la diferencia estadísticamente significativa se realizó una prueba de rangos múltiples (Ver Tabla 4.12), teniendo en cuenta el valor P.

**Tabla 4.12** Prueba de rangos múltiples

<b>Mezcla</b>	<b>Casos</b>	<b>Media (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
<b>Simple</b>	4	249.93	X
<b>Sikacrete 950-DP</b>	4	256.352	X
<b>Sikafiber</b>	4	295.22	X

<b>Contraste</b>	<b>Sig.</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>
<b>Mezcla simple-Sikacrete 950 DP</b>	*	38.5855	10.8931
<b>Mezcla simple – Sikafiber</b>		-0.282	10.8931
<b>Sikacrete – Sikafiber</b>	*	-38.8675	11.4823

En la Tabla 4.12, se aplicó un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza.

En la parte superior de la Tabla 4.12, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

#### **4.5. Absorción**

En la Tabla 4.13, se presentan los resultados obtenidos para la absorción según la norma ASTM correspondiente. En dicha Tabla los datos relevantes a tener en cuenta en la discusión son la absorción después de inmersión y el volumen de vacío, que son los dos parámetros que nos indican cuanto liquido puede ingresar a la estructura del concreto y el volumen de vacíos que evidencia la disminución o aumento de poros en el mismo.

**Tabla 4.13** Absorción de las tres mezclas a 28 días

<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Absorción después de inmersión</b>	<b>Absorción después de inm. y ebullición</b>	<b>Densidad después de inmersión</b>	<b>Densidad aparente</b>	<b>Volumen de vacío</b>
Simple	9.45	9.89	2.31	2.63	18.95
Sikafiber	9.18	9.25	2.26	2.61	19.20
Sikacrete 950-DP	9.20	9.69	2.28	2.64	18

La mezcla de concreto adicionada con la base de microsilica (sikacrete 950-DP) arroja los valores de absorción y porosidad más bajos comparados con los valores de las demás mezclas, esto demuestra que esta mezcla posee una estructura más compacta, por lo que la hace menos permeable, tal resultado difiere con los datos obtenidos de resistencia a la compresión simple, ya que esta mezcla obtuvo la menor resistencia. Este último parámetro pasa a segundo plano, ya que lo que se buscaba era la impermeabilización del concreto para evitar el ingreso de agentes agresivos como lo son los sulfatos.

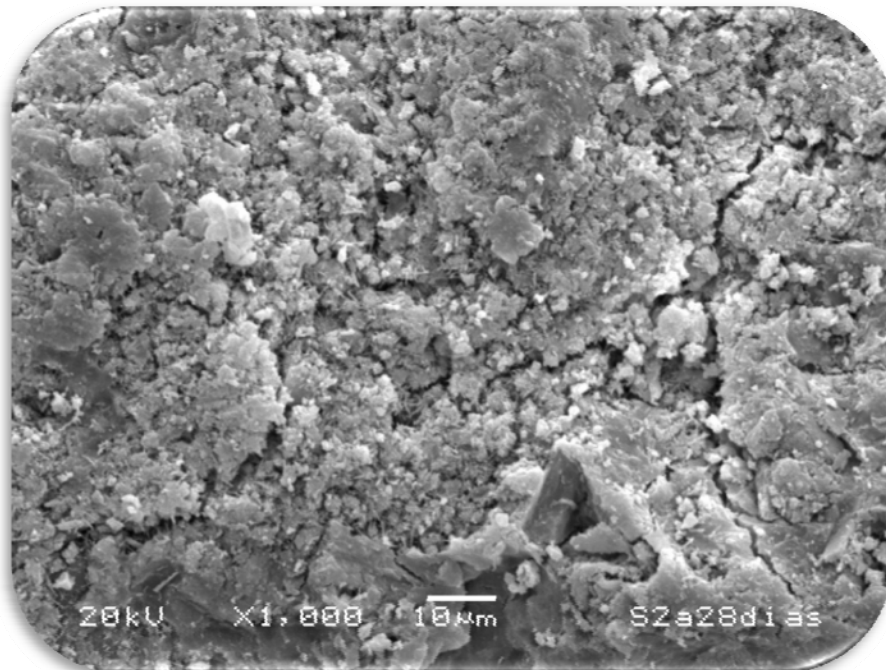
#### **4.6. Análisis de imágenes, Microscopia electrónica de barrido**

Los resultados obtenidos en el microscopio electrónico de barrido de las muestras antes y después de su exposición a los 28 días son presentadas a continuación, las muestras fueron evaluadas a cinco ampliaciones, 15x, 100, 200x, 500x, 1000x. Las micrografías que se tomaron de las tres muestras de concreto endurecido en las edades de curado evaluadas (3, 7, 14 y 28 días) antes y después del ataque del sulfato de magnesio, son presentadas en el apéndice al final de este documento.

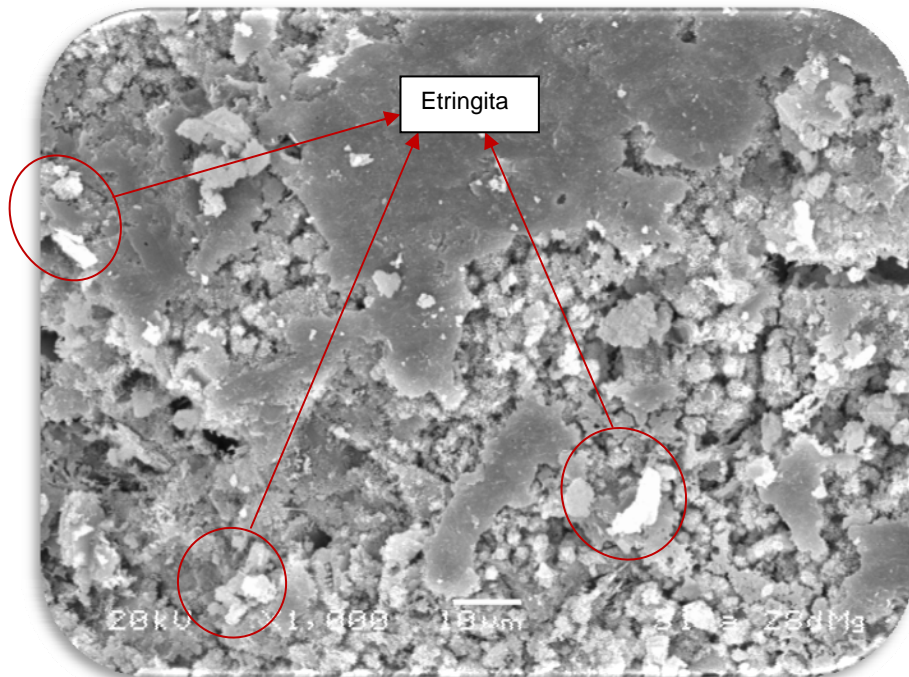
En la Figura 4.6, correspondiente a la micrografía de concreto endurecido adicionado con Sikacrete 950-DP, se observa la formación de portlandita que a la edad de 28 días, presenta un aumento considerable en la cristalinidad, aparecen mejor cristalizadas, ya que es posible apreciar con claridad sus bordes bien

definidos y la forma hexagonal que las caracteriza, también se encuentran los cristales menos dispersos con respecto a las edades anteriores. Se puede decir que las portlanditas bien cristalizadas se forman a partir del silicato tricálcico, según lo afirmado por Balázs *et. al.*, 1997. En el análisis preliminar que se realizó de estas micrografías, se observa que la porosidad de las mezclas disminuyó, particularmente la mezcla de sikacrete 950-DP y en esta mezcla se empezaron a notar hábitos de crecimiento cristalino normales del concreto endurecido.

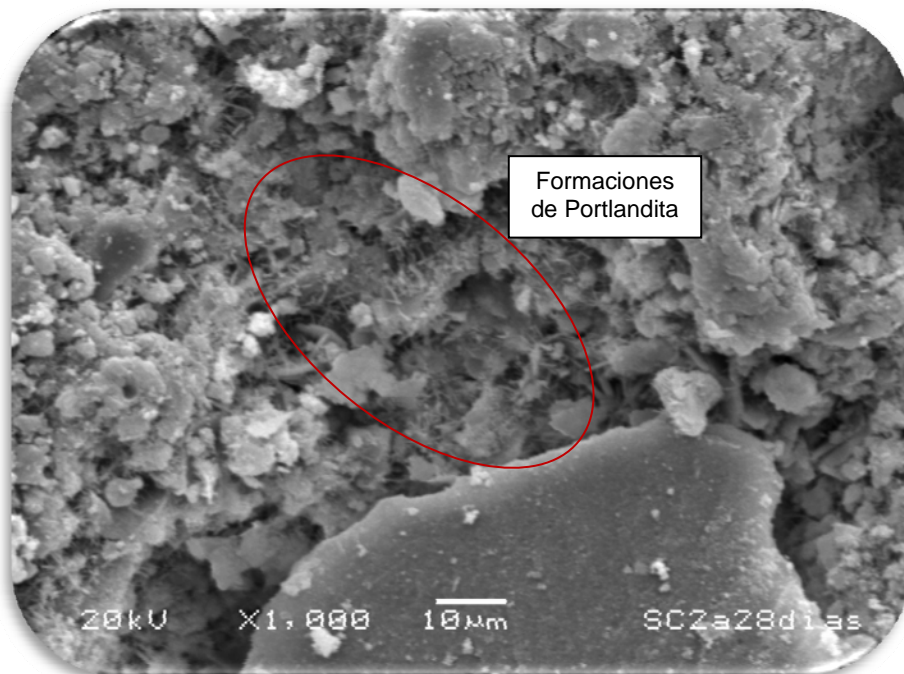
En cuanto a la mezcla de concreto endurecido con adición de Sikafiber, se muestra que el refuerzo secundario es proporcionado por parte de la unión mecánica de las fibras y se observa que las formaciones de etringita se generaron incluso antes de la inmersión en el sulfato de magnesio. La etringita se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas y se produce en edades tardías mayores a 28, según lo afirman Marusin *et. al.*, 2000. La etringita observada en la figuras 4.5, 4.8 y 4.9, se presenta bien cristalizada y de un tamaño inferior a 1 micra, no se trata de una fase muy abundante, ya que las manifestaciones de este mineral son muy puntuales y no se observaron distribuidas a lo largo de toda la muestra.



**Figura 4.4.** Micrografía de la mezcla simple a 28 días



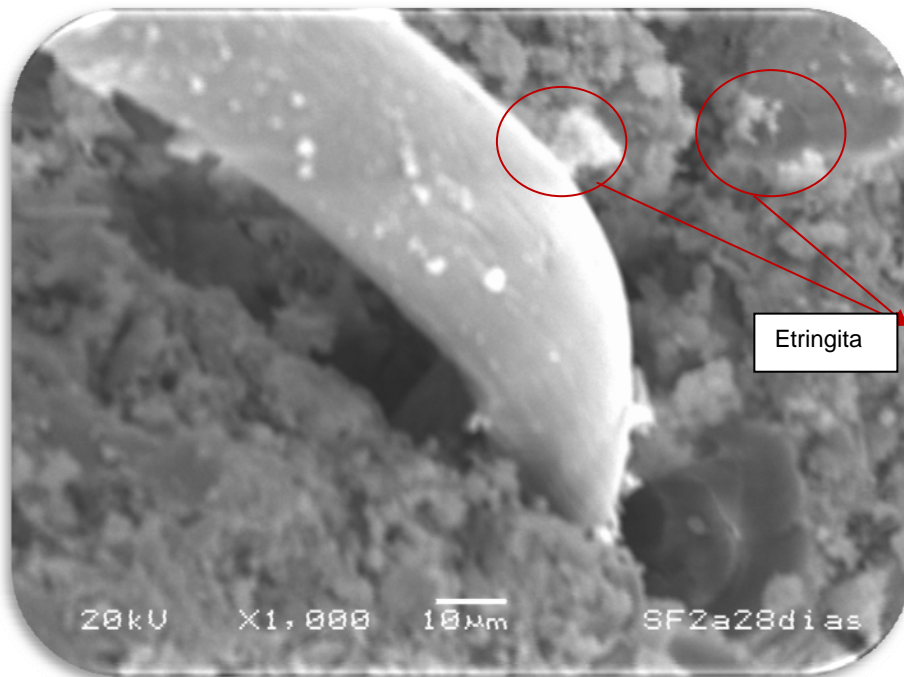
**Figura 4.5.** Micrografía de la mezcla simple a 28 días, atacada con  $MgSO_4$



**Figura 4.6.** Micrografía de la mezcla sikacrete 950-DP a 28 días



**Figura 4.7.** Micrografía de la mezcla sikacrete 950-DP a 28 días, atacada con  $MgSO_4$



**Figura 4.8.** Micrografía de la mezcla sikafiber a 28 días





**Figura 4.9.** Micrografía de la mezcla sikafiber a 28 días, atacada con  $MgSO_4$

#### 4.7. Evaluación hidráulica de un bloque

Los resultados obtenidos para el bloque constitutivo del colchón flexible de concreto, en la evaluación hidráulica se presentan en la Tabla 4.14.

**Tabla 4.14.** Resultados evaluación hidráulica

<b>Material</b>	<b>Pendiente</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>n</b>	<b>Falla</b>
	<b>(m/m)</b>	<b>(m/s)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/s)</b>		
Acero inoxidable	0	0.73	0.05	0.007	no
Acero inoxidable	1	1.60	0.07	0.007	no
Acero inoxidable	2	1.93	0.07	0.007	si

<b>Material</b>	<b>Pendiente</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>n</b>	<b>Falla</b>
	<b>(m/m)</b>	<b>(m/s)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/s)</b>		
Tapete antideslizante	0	0.73	0.05	0.010	no
Tapete antideslizante	1	1.60	0.07	0.010	no
Tapete antideslizante	2	3.37	0.12	0.010	no

Material	Pendiente	V	Q	n	Falla
	(m/m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)		
Jerga	0	0.73	0.05	0.014	no
Jerga	1	1.60	0.07	0.014	no
Jerga	2	3.50	0.15	0.014	no

Con los resultados anteriores se demuestra que en una superficie lisa, un bloque puede resistir un caudal de 0.07 m<sup>3</sup>/s, teniendo una pendiente de 1%. En el terreno natural no se van a encontrar tales condiciones, sin embargo, si van a encontrarse suelos con rugosidad natural que ayudará a retener el bloque. Esta prueba fue para un solo bloque, pero en una condición natural donde varios bloques están unidos, esto no sucederá. La rugosidad obtenida de la prueba hidráulica está entre 0.007 y 0.014 es un dato importante ya que en comparación con la rugosidad del suelo en las orillas de río reportada en la literatura es 0.020, es decir, el bloque no reportará deslizamientos en el terreno natural debido a este coeficiente de rugosidad.

#### *Análisis de estabilidad del bloque*

En la siguiente Tabla se muestra cual es la fuerza necesaria para que el bloque presente falla o se deslice.

**Tabla 4.15. Prueba de estabilidad**

Pendiente (°)	Fuerza necesaria (kg)
0	4.56
15	2.06
30	0.85
45	0.32

En la Tabla 4.15, se observó que a medida a aumenta la pendiente se disminuye la fuerza requerida para que el bloque se desplace sobre el eje x. En el valor máximo de pendiente presentado, es necesario reforzar el sistema con anclajes en el sitio más plano que presente el talud u orilla a revestir.

#### 4.8. Evaluación económica por bloque

A continuación se presenta en la Tabla 4.15 el análisis económico que se realizó para los materiales necesarios en la elaboración del bloque propuesto, excluyendo los precios de la cimbra y la mano de obra.

**Tabla 4.15.** Costo de materiales para elaboración de un bloque

<b>Material</b>	<b>Presentación</b>	<b>Contenido</b>	<b>Precio por unidad</b>
<b>Cemento</b>	1 bulto	50 kg	106.52
<b>Grava</b>	1 viaje	7 m <sup>3</sup>	1608
<b>Arena</b>	1 viaje	7 m <sup>3</sup>	1128
<b>Sikacrete 950-DP</b>	1 bolsa	11.35 kg	319

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad requerida (g)</b>	<b>Costo</b>
<b>Cemento</b>	g	2446	\$ 5.21
<b>Grava</b>	g	6837	\$ 1.01
<b>Arena</b>	g	5533	\$ 0.68
<b>Sikacrete 950-DP</b>	g	244	\$ 6.85
		<b>Total</b>	<b>\$ 13.75</b>

Como se indica en la Tabla 4.15, el costo de los materiales para elaborar el bloque que constituye el colchón flexible, que tiene un volumen de 0.006899 m<sup>3</sup>, es 13.75 pesos; este valor incluye el aditivo propuesto en esta investigación por el aporte a las propiedades impermeabilizantes en el concreto endurecido.

Un colchón flexible de concreto podrá ser construido de tantos bloques propuestos como sea necesario, según el área requerida para revestimiento. El costo por m<sup>2</sup> de un colchón flexible de concreto es de 123.75 pesos M.N aproximadamente.

## V. CONCLUSIONES

- El diseño propuesto resultó en un prototipo de bloque adecuado que mostró flexibilidad y geometría apropiados para el cumplimiento del objetivo planteado.
- El análisis estadístico de los datos de compresión simple, permitió determinar que la mezcla sikacrete 950-DP fue la de menor resistencia. La mezcla con fibras de polipropileno (sikafiber) para la elaboración de los bloques componentes del colchón flexible y la mezcla simple, obtuvieron los valores más altos de resistencia. No existió una diferencia estadísticamente significativa entre estas dos mezclas de acuerdo a la prueba de comparación de medias de LSD ( $\alpha=0.05$ ).
- Sin embargo, la mezcla con base de microsílica (sikacrete 950-DP) obtuvo las mejores características respecto a las propiedades físicas de absorción y volumen de vacíos, lo que indica que esta mezcla potencialmente presenta un mejor desempeño y durabilidad en el medio expuesto. El análisis mediante la microscopía electrónica de barrido confirmó la baja porosidad de dicha mezcla.
- La evaluación hidráulica realizada al bloque constitutivo del colchón mostró una estabilidad adecuada bajo el efecto del flujo hidráulico hasta velocidades de 2 m/s en pendientes del 2%, bajo las condiciones de laboratorio. Esta estabilidad puede incrementarse en condiciones naturales cuando el colchón se encuentre en contacto con superficies más rugosas como es el suelo.

- El bloque fue estable en pendientes de 2% con rugosidades de 0.014 (coef. de Manning) para condiciones de laboratorio. En campo, las  $n$  son de 0.035 por lo que el bloque no tendría deslizamientos para condiciones similares.
- El diseño geométrico de los elementos constitutivos del colchón flexible permite por su propio peso de 14.19 kg estabilizar el suelo con el potencial de reducir el desprendimiento de las partículas de suelo.
- Aunque se realizó un análisis de estabilidad de un bloque que conforma el colchón y se determinó en que rangos de rugosidades, pendientes y caudales, es posible una falla por deslizamiento, en la práctica la estabilidad del colchón aumentará debido al peso en conjunto de los bloques y al cable que los une.
- El agujero en el centro de los bloques permite el crecimiento de la vegetación que reforza con el enraizamiento la retención del suelo y cohesión del mismo, protegiéndolo de la erosión causada por las corrientes de un río.

## REFERENCIAS

- Alaejos P., Fernandez M. 1996. High-performance concrete: requirements for constituents materials and mix proportioning. ACI Materials Journal. U.S.A. 93(3), p. 236.
- American Concrete Institute, ACI Committee 211. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, (ACI 211.1-91). Farmington Hills, MI.
- American Society of Testing Materials ASTM C1116 Standard Specification Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete.
- American Society of Testing Materials ASTM C125 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.
- American Society of Testing Materials ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- American Society of Testing Materials ASTM C128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- American Society of Testing Materials ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- American Society of Testing Materials ASTM C192 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
- American Society of Testing Materials ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates.
- American Society of Testing Materials ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- American Society of Testing Materials ASTM C617 Standard Method of Capping Cylindrical Concrete Specimens.
- American Society of Testing Materials ASTM C642 Standard Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- American Society of Testing Materials ASTM C88 Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate
- Arroyo Ramos, Ángel. 2006. Solución efectiva en taludes y protección de ductos. Sub Marelher, S.A. de C.V. Tlaloc, Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Bassuoni M.T., and Nehdi M.L. 2009. Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading. Cement and Concrete Research. Volume 39, Issue 3, March 2009, Pages 206-226
- Cerón M, Duarte F., Castillo W., Chim S. 1994. Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida. Boletín académico FIUADY. México, (31), p.27.

- Chan P. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. *ACI Materials journal*. 4: 357.
- Chan Yam José Luis, Solís Carcaño Rómel, Moreno Eric Iván. 2003. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería* 7:39-46
- Dayton & Knight Ltd, 1999. Best management practices guide for stormwater.
- El.Aziz M. Abd, El.Aleem S. Abd, Heika M.and H. El. 2005. Didamony, Hydration and durability of sulphate-resisting and slag cement blends in Caron's Lake water. *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 8, August 2005, Pages 1592-1600
- Estrada M., Alonso E., Chávez L. E, Chávez H. L., Martínez W, Rubio J. C., Velasco F., Ávalos M. 2005. Hidratación del Cemento Pórtland, fase Etringita; Monosulfatos y Trisulfatos. 1º Foro Académico de la DES de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Grágeda Zegarra Mario, Montesinos Susana. 2006. Aplicaciones de microscopia electrónica de barrido (sem) y análisis de fractura de una aleación de cu – 10 al doctorado en ciencias de la ingeniería, mención ciencia de los materiales, facultad de ciencias físicas y matemáticas, universidad de chile.
- Gray, D.H., A.T. Leiser. 1982. *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold. New York, NY. Krieger Pub.Co., Melbourne, FL
- Hekala E.E., Kisharb E., Mostafa H. 2002. Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1421–1427
- Helene Paulo, Pereira Fernanda. 2003. *Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección*.-CYTED.-Brasil.-Septiembre. pp.46,47
- <http://www.revetmentsystems.com/es/products.html>
- Hudson, N. 1995. *Soil Conservation*. New edition. Iowa State University Press. Ames, Iowa. Ch. 3.
- Icbo Evaluation Service, Inc., *Acceptance Criteria for Concrete with Synthetic Fibers*, January 1993.
- Johansen, Vagn C., Klemm, Waldemar A., and Taylor, Peter C. 2002. Adaptación del Artículo publicado en *ACI Concrete International*, de marzo de 2002.
- Kurdowski W. 1993. Durability of blended cements in aggressive media, in: S.L. Sarkar (Ed.), *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*, vol. 4, ABI Books, pp. 448– 466.
- Lambe TW, Whitman RV (1979) *Soil Mechanics*, SI version. Wiley & Sons, New York.
- Lamprecht, H. 1990 *Silvicultura en los trópicos*. Deutsche gesellschaft fuer technische zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Eschborn, Alemania. 335 p.

- Mehta P.K., Sulfate attack on concrete: A critical review, in: R.R. Villarreal (Ed.), Concrete Durability, Univ. Autónoma de Nuevo Leon, 2003, pp. 107– 132
- Mejia Ruby, Rodríguez Patricia. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. CYTED. México, 1999.
- Montgomery DR. 1997. What's best on banks? Nature 388: 328–329.
- Moreno, E.I., Pérez, T., y Torres, A. (2001). Mecanismos de deterioro en ambientes marinos y urbanos, en "Infraestructura de Concreto Armado: Deterioro y Opciones de Preservación", Pedro Castro Borges, coord., pp. 13-31, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, D.F.
- Murria S.P. (2001) "Coastal shoreline protection for the naval air station – Key west landfill". IECA. Shoreline stabilization. Soil stabilization series. Vol. 16. pp1-12.
- Neville A. 1997. Aggregates bond and modulus of elasticity of concrete. ACI Materials Journal. U.S.A. 94(72), p.72
- Neville A. 1999. Tecnología del concreto. Instituto Mexicano del cemento y del concreto. México, p. 549.
- Paez, M.L. and Pla, I. 1987. Development and Testing of Erodibility Indices for Selected Venezuelan Soils. Soil Conservation and Productivity 2: 810-821.
- Palbol L. 1996. Optimización de los agregados para concreto. Construcción y Tecnología. México, 9(100), p.30.
- Pizzuto JE, Mecklenburg TS. 1989. Evaluation of a linear bank erosion equation. Water Resources Research 25: 1005–1013.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. Catena, 50: 91-113.
- Ratay R. (2000). "Forensic Structural Engineering Handbook", Mc Graw- Hill, New York.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, and J.R. Porter. 1991. RUSLE Revised Universal Soil Loss Equation. J. Soil and Water Conservation. 46: 30-33
- Rzedowski, J. 1994. Vegetación de México. Sexta impresión. Editorial Limusa. México D. F. 327-348 pp.
- Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte, Durabilidad de la Infraestructura de concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbanos de México. 2006. Publicación Técnica No. 292. Sanfandila, Qro, México.
- Seguel C., H. 2006. Hormigones de alta resistencia H-70. Tesis. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Ciencias de la Ingeniería. 125 p.
- Simon A, Collinson A. 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on stream bank stability. Earth Surface Processes and Landforms 27: 527–546.



- Solís Carcaño Rómel G., Moreno Éric Iván, Castro Borges Pedro. Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. 2005.
- Suárez de Castro., F. Conservación de suelos. 3a edición. San José de Costa Rica. 1982. 315 p.
- Tecnología y propiedades. Colección Básica del Concreto 1. Instituto del Concreto ASOCRETO. 2 ed. Colombia, 1997. 127 – 136.
- Teixeira Ribeiro, Bruno. 2006. Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um cambissolo. Universidade Federal de Lavras. Brasil. pp 62
- Toy Terrence J., Foster George R. and Renard Kenneth G. 2002. Soil Erosion: Prediction, Measurement and Control.
- Troeh, F.R., Hobbs, J.A., and Donahue, R.L. 1991. Soil and Water Conservation. 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice-Hall, New Jersey, U.S.A.
- Uribe R. 1991. El control de la calidad en los agregados para concreto. Tercera parte. Construcción y tecnología. México (40), p.34
- Varnes DJ (1978) Slope movements: type and processes. In: Schuster RL, rizek RJ (eds). Landslides analysis and control. Transport research board, Special report 176, Academy Press, Washington, DC pp 11-33
- Vázquez Vidal, E. y González, P. 2003. "Degradación de la superficie del suelo y erosión hídrica en el año agrícola 2002-2003". Congreso: "IV Congreso sobre Erosión Hídrica". Organizado por la Universidad de A Coruña. 13-15 de noviembre de 2003. Coruña, España.

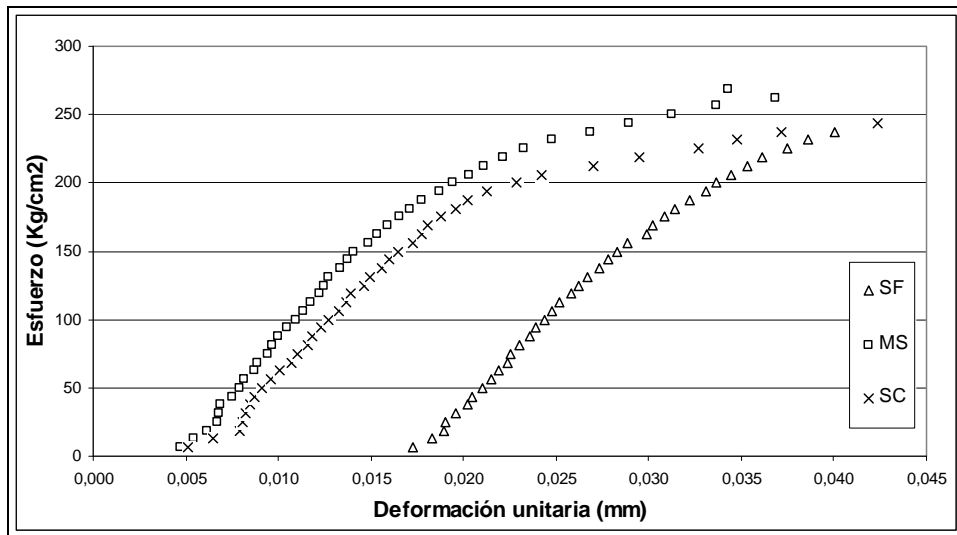
# APENDICE

## GRÁFICAS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN

- **Gráficas de esfuerzo-deformación para las mezclas sin ataque de  $MgSO_4$**

A continuación se muestran las gráficas de esfuerzo – deformación obtenidas a los 3, 7, 14 y 28 días para cada una de las mezclas (simple o control, sikacrete 950-DP, sikafiber), notándose como máxima la resistencia soportada de la mezcla adicionada con la fibra de polipropileno (sikafiber).

En la Figura A1, se observa que la resistencia máxima fue la mezcla simple (MS) con aproximadamente  $260 \text{ kg/cm}^2$ . El comportamiento de los datos de la mezcla con el aditivo sikacrete 950-DP (SC) es similar con la mezcla simple de acuerdo al análisis estadístico, teniendo como valor máximo aproximado  $247 \text{ kg/cm}^2$ .



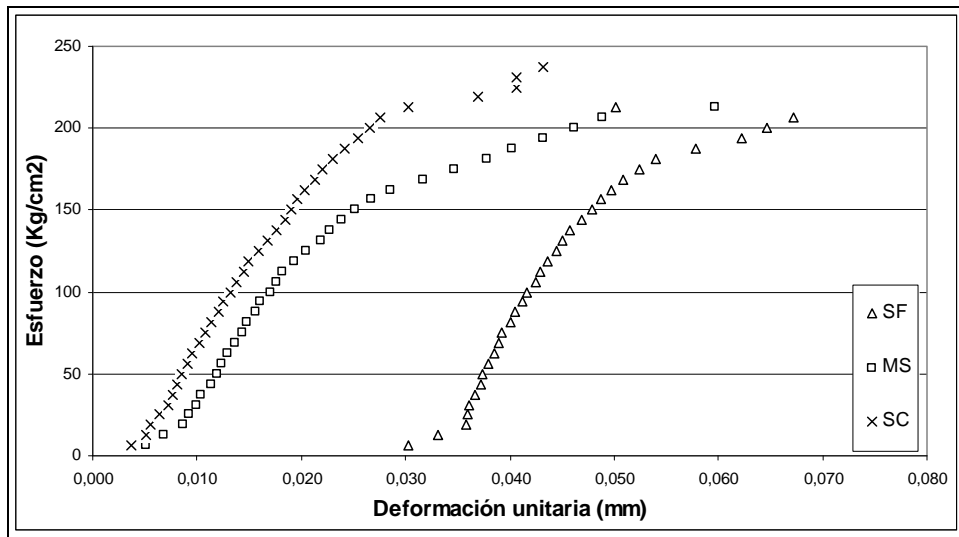
**Figura A1.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 28 días

**Tabla A1.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 28 días

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$1,02 * 10^5$
Sikacrete 950-DP	$1,03 * 10^5$
Sikafiber	$8.82 * 10^4$

La Tabla A1 indica que el mayor valor del módulo de elasticidad es de la mezcla con sikacrete 950-DP, dicho valor confirma el grado de rigidez que posee la estructura interna de esta mezcla.

Para los 14 días de edad de curado, la Figura A2 muestra que la resistencia máxima la obtuvo la mezcla con sikacrete 950 DP, seguido por las dos mezclas restantes con valores aproximados a los 210 kg/cm<sup>2</sup>.



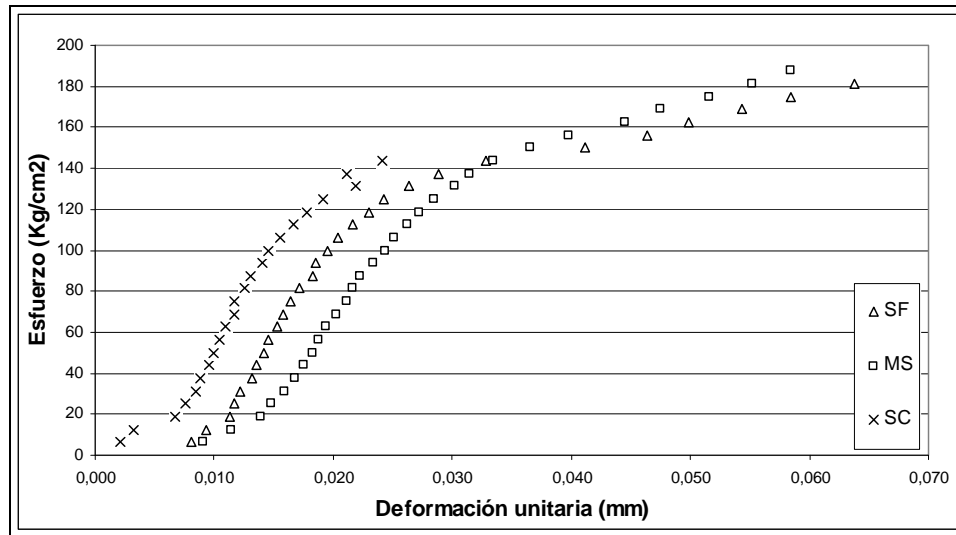
**Figura A2.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 14 días

**Tabla A2.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 14 días

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$3,4 * 10^4$
Sikacrete 950-DP	$5,9 * 10^4$
Sikafiber	$4,5 * 10^4$

En la Tabla A2, se observa que el módulo de elasticidad menor lo tuvo la mezcla simple, seguido por la mezcla con fibras de polipropileno, quedando el valor más alto para la mezcla con base de microsílca. Lo anterior indica que el material menos rígido a los 14 días de curado es esta última mezcla, siendo la más rígida la mezcla simple.

La mezcla simple y la mezcla con el aditivo de fibra de polipropileno presentaron un comportamiento homogéneo con resistencias de 180 kg/cm<sup>2</sup>, la mezcla a base de microsílca quedó abajo con un valor de 140 kg/cm<sup>2</sup>, como se muestra la Figura A3.



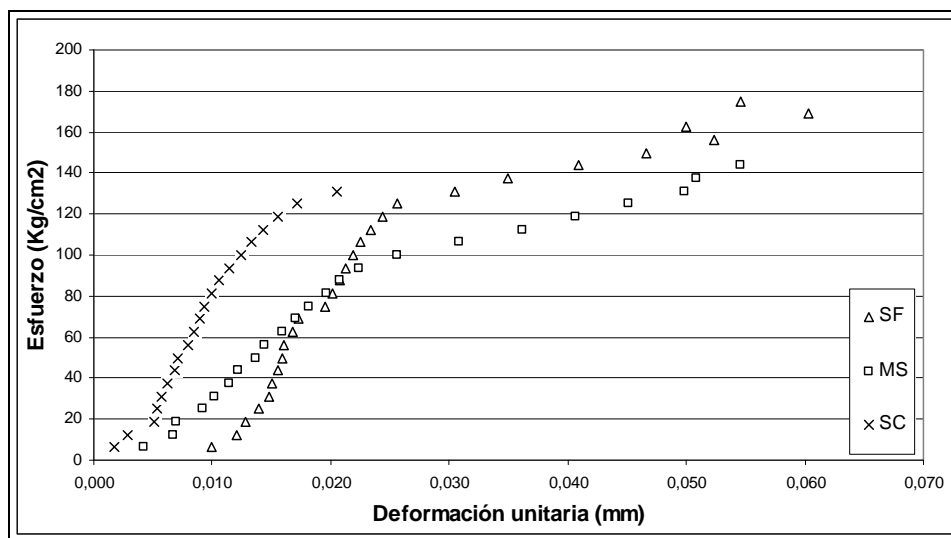
**Figura A3.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 7 días

**Tabla A3.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 7 días

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$3,4 * 10^4$
Sikacrete 950-DP	$5,5 * 10^4$
Sikafiber	$3,0 * 10^4$

Con 7 días de curado en agua el comportamiento del módulo de elasticidad fue el que sigue: la mezcla con fibras de polipropileno o sikafiber presentó el valor mínimo, seguido de la mezcla simple; por último la mezcla con la estructura menos rígida fue la que contiene la base de microsílca (sikacrete 950-DP).

En la Figura A4, se observa dispersión de los datos, lo que indica un comportamiento heterogéneo, sin embargo no es representativo ya que el concreto tiene su resistencia máxima a los 28 días.



**Figura A4.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 3 días

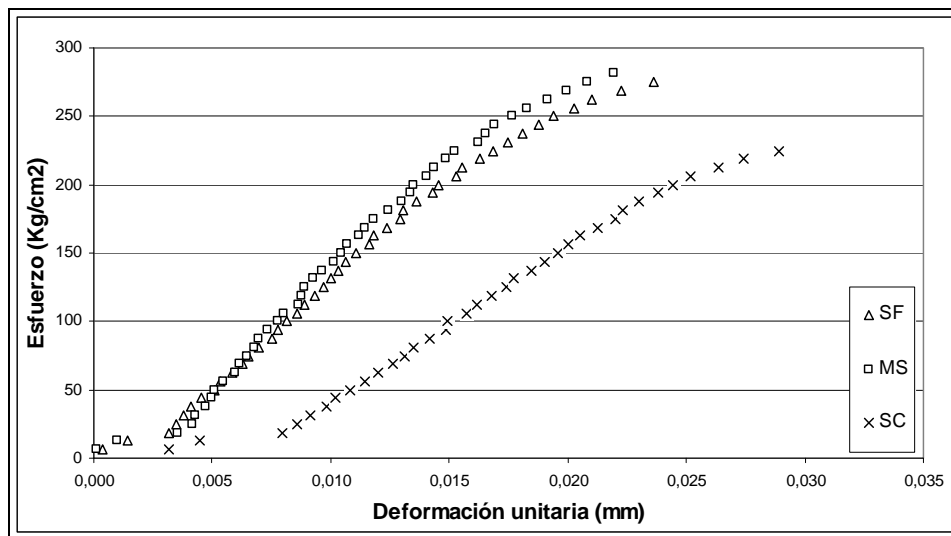
**Tabla A4.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 3 días

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$2,3 * 10^4$
Sikacrete 950-DP	$6,6 * 10^4$
Sikafiber	$3,0 * 10^4$

El módulo de elasticidad para la mezcla simple observado, fue el menor valor para la edad de 3 días de curado, seguida con la mezcla de base de microsílca y con su valor máximo la mezcla con sikafiber con  $6,6 * 10^4$  MPa, siendo esta última la estructura menos rígida a esta edad específica.

- **Gráficas de esfuerzo-deformación para las mezclas atacadas con MgSO<sub>4</sub>**

A continuación se presentan los resultados de las muestras ensayadas en la máquina universal a compresión simple después de someterse a cinco ciclos de humedecimiento y secado, por medio de esta prueba se obtuvieron también las deformaciones verticales de las muestras y se pudo calcular el módulo de elasticidad.

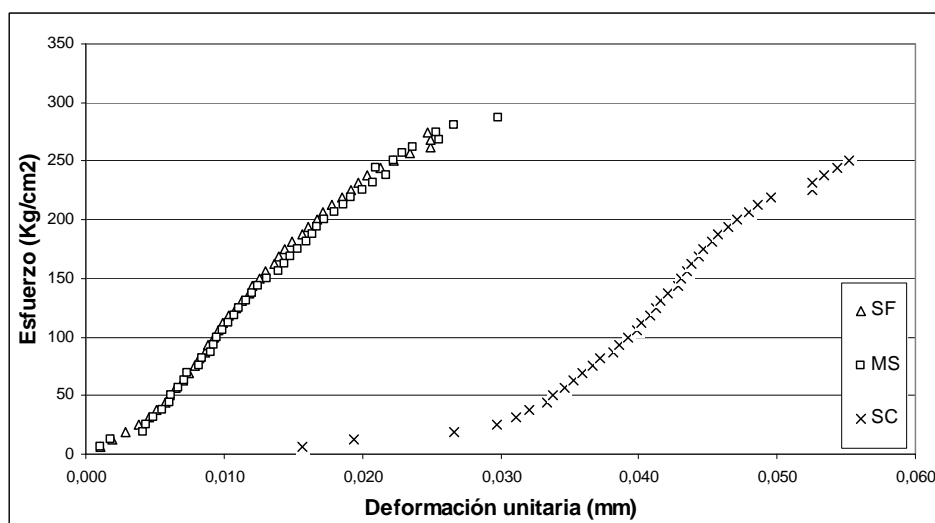


**Figura A5.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 28 días, expuestas a  $MgSO_4$

**Tabla A5.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 28 días, expuestas a  $MgSO_4$

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$1,2 * 10^5$
Sikacrete 950-DP	$8,82 * 10^4$
Fibra de polipropileno	$1,07 * 10^5$

En la Figura A6, se observa un comportamiento homogéneo de las mezclas simple y con sikafiber alcanzando un valor de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , la mezcla con base de microsílca quedó abajo con un valor aproximado  $225 \text{ kg/cm}^2$ .

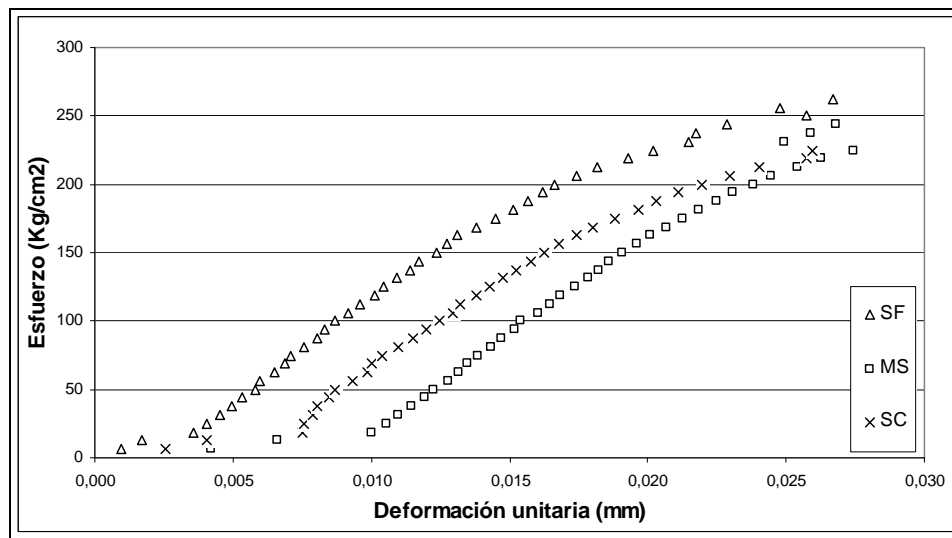


**Figura A6.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 14 días

**Tabla A6.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 14 días, expuestas a MgSO<sub>4</sub>

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	1,1 * 10 <sup>3</sup>
Microsilica	1,1 * 10 <sup>3</sup>
Fibra de polipropileno	1,1 * 10 <sup>3</sup>

El comportamiento de la mezcla simple y la mezcla con sikafiber es similar, su valor máximo de resistencia fue de 280 kg/cm<sup>2</sup>, por el contrario la mezcla con sikacrete 950-DP se quedó abajo con 250 kg/cm<sup>2</sup>. Ver Figura A7.



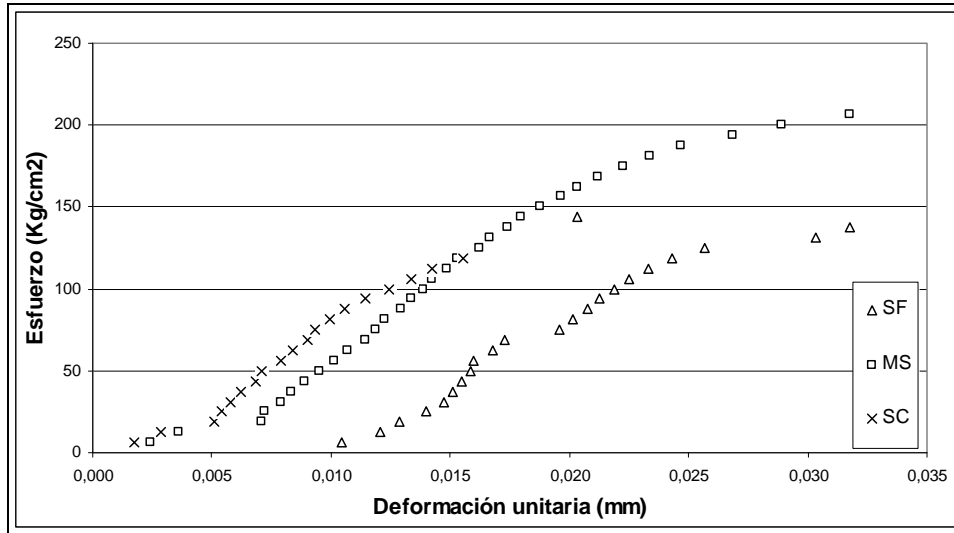
**Figura A7.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 7 días

**Tabla A7.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 7 días, expuestas a MgSO<sub>4</sub>

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	1,2 * 10 <sup>3</sup>
Sikacrete 950-DP	1,1 * 10 <sup>3</sup>
Sikafiber	1,3 * 10 <sup>3</sup>

En la Figura A8, se observa que la resistencia a la compresión máxima para esta edad la alcanzó la mezcla con sikafiber con 260 kg/cm<sup>2</sup>, seguida por la mezcla simple y la mezcla con base de microsilica.





**Figura A8.** Gráfica esfuerzo-deformación a los 3 días

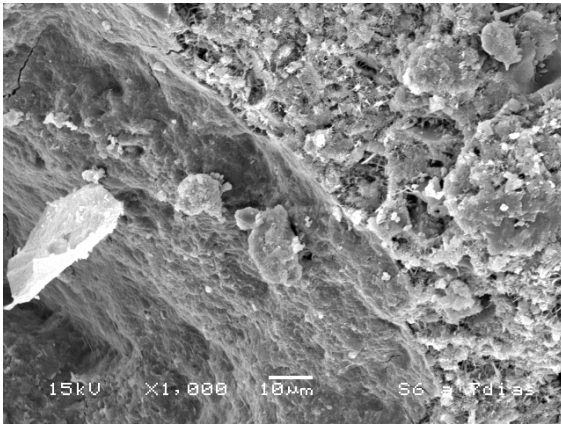
**Tabla A8.** Módulo de elasticidad de las mezclas a 3 días, expuestas a  $MgSO_4$

Mezcla	Módulo de Elasticidad (MPa)
Simple	$7,7 * 10^2$
Sikacrete 950-DP	$9,8 * 10^2$
Sikafiber	$8,1 * 10^2$

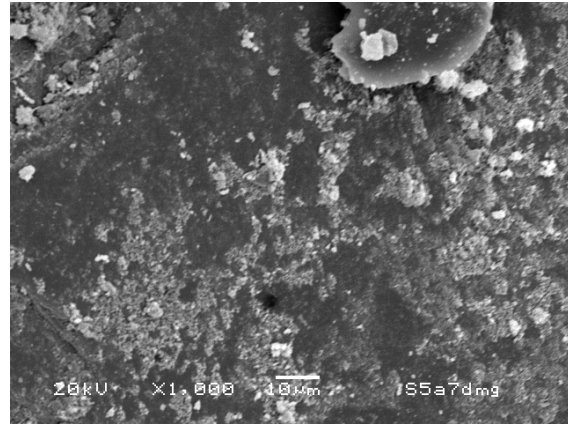
A la edad de tres días de curado los datos se muestran dispersos, la mezcla que obtuvo la resistencia máxima fue la simple con  $210 \text{ kg/cm}^2$ , seguida de la mezcla con fibra de polipropileno (sikafiber) con  $140 \text{ kg/cm}^2$ , la resistencia más baja fue la registrada por la mezcla con base de microsílca con  $125 \text{ kg/cm}^2$  aproximadamente.

**MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE BARRIDO DE LAS MEZCLAS A 7 DIAS DE CURADO**

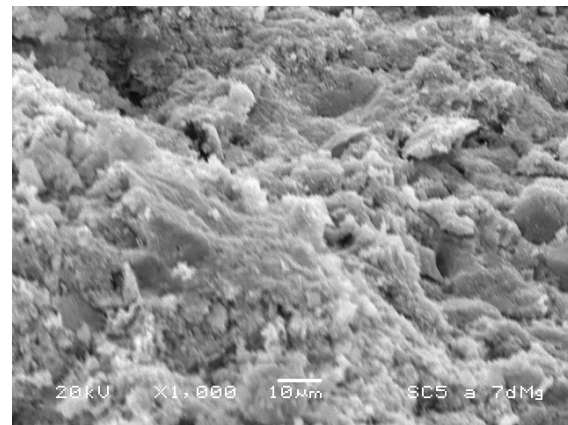
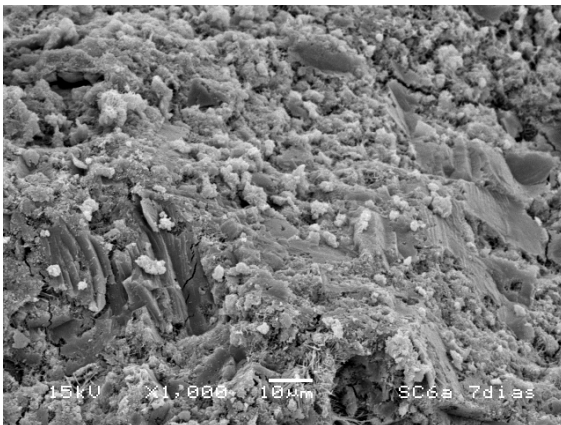
**MEZCLAS SIN ATAQUE**



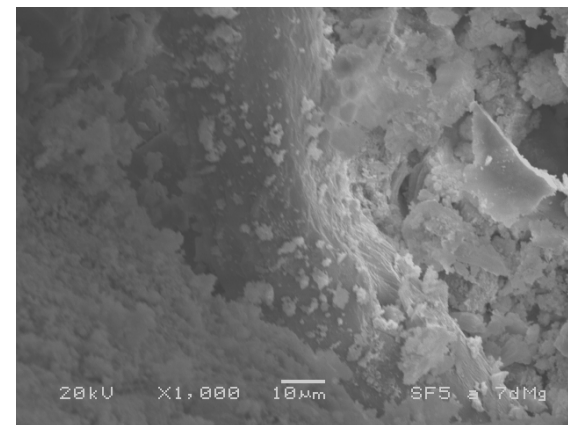
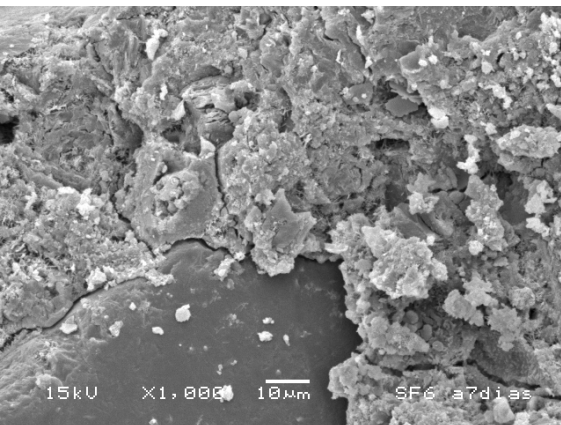
**MEZCLA ATACADA CON MgSO4**



**SIMPLE**



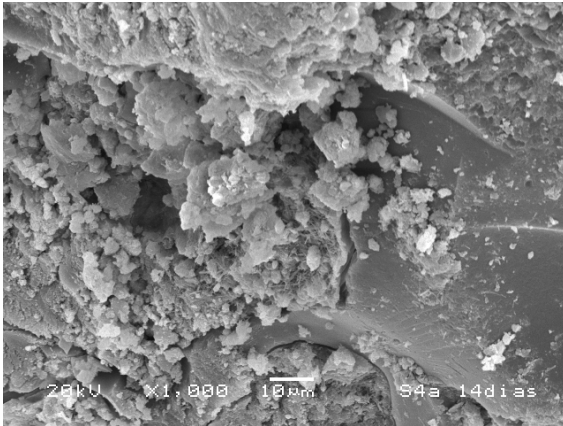
**SIKACRETE 950-DP**



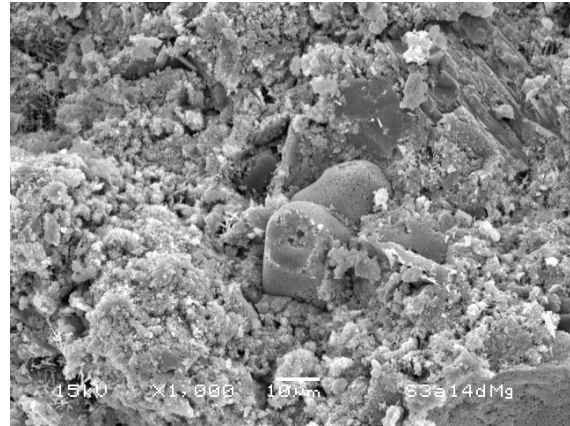
**SIKAFIBER**

**MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE BARRIDO DE LAS MEZCLAS A 14 DIAS DE CURADO**

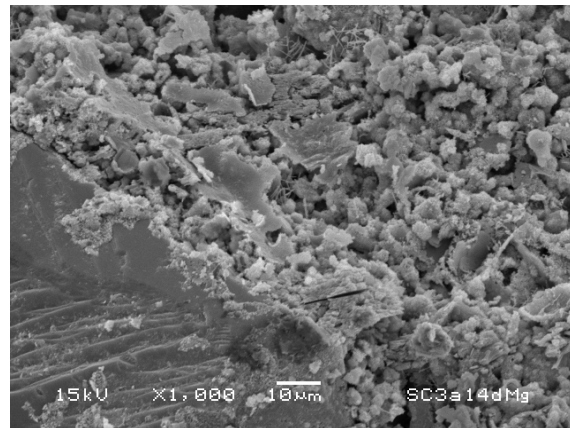
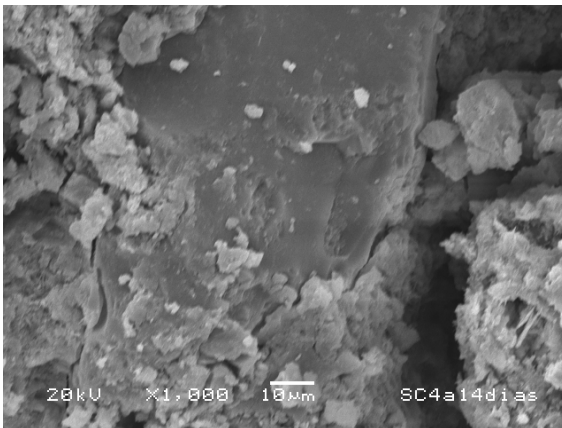
**MEZCLAS SIN ATAQUE**



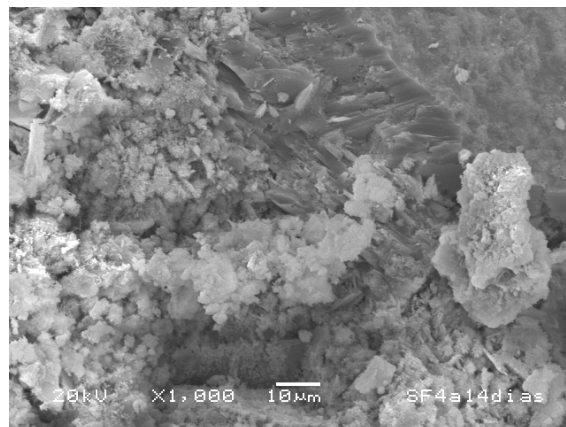
**MEZCLA ATACADA CON MgSO4**



**SIMPLE**



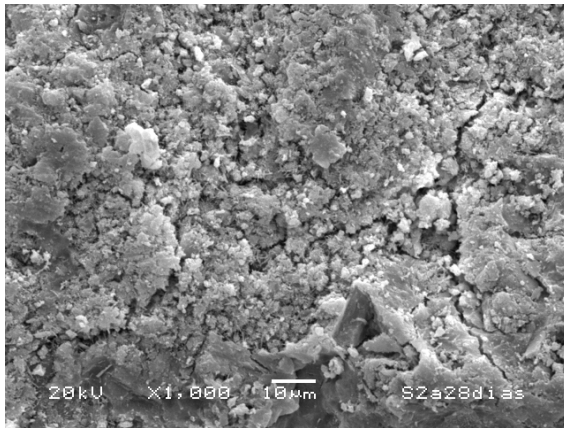
**SIKACRETE 950-DP**



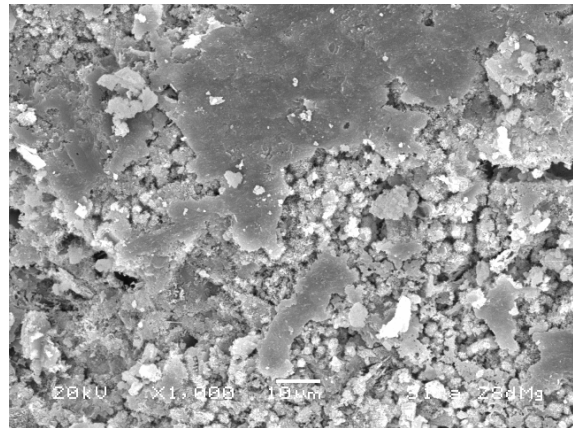
**SIKAFIBER**

**MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE BARRIDO DE LAS MEZCLAS A 28 DIAS DE CURADO**

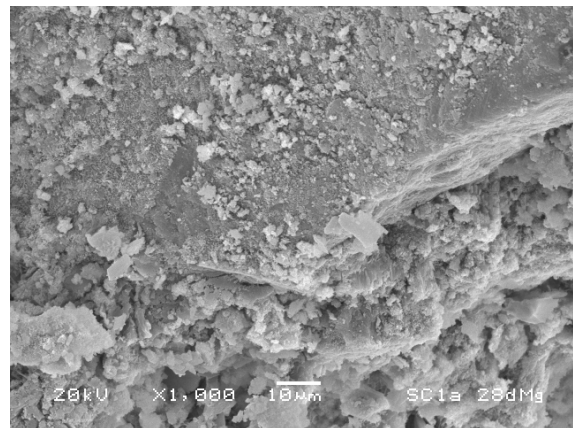
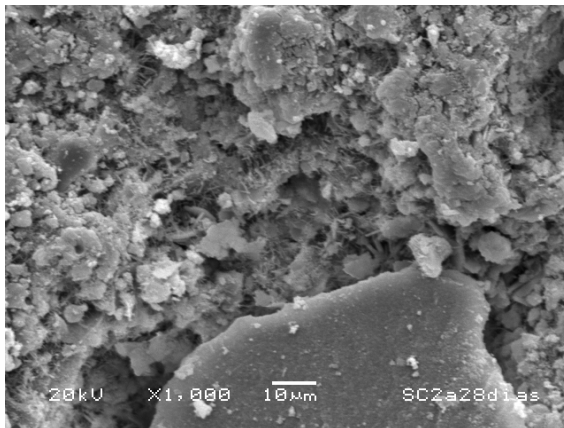
**MEZCLAS SIN ATAQUE DE MgSO<sub>4</sub>**



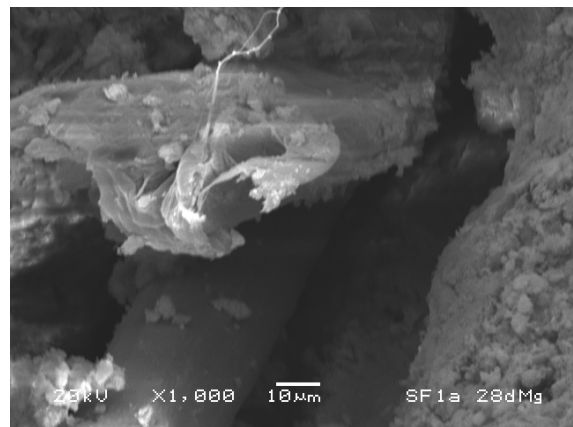
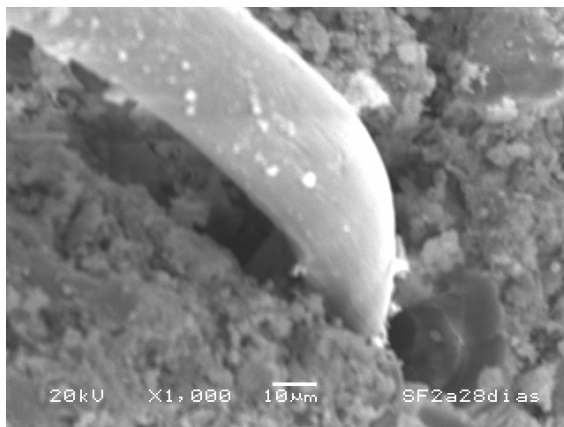
**MEZCLA ATACADA CON MgSO<sub>4</sub>**



**SIMPLE**



**SIKACRETE 950-DP**



**SIKAFIBER**