



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EXPLORACIÓN DE MATERIALES RECICLABLES
PARA LA SUSTITUCIÓN DE MALLAS
ELECTROSOLDADAS EN EL REFUERZO DE
CONCRETO EN PLACAS DE PISO**

Diego Fernando Vallejo Lucero

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales
Medellín, Colombia

2021



EXPLORACIÓN DE MATERIALES RECICLABLES PARA LA SUSTITUCIÓN DE
MALLAS ELECTROSOLDADAS EN EL REFUERZO DE CONCRETO EN PLACAS
DE PISO

Diego Fernando Vallejo Lucero

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero de Materiales.

Asesores:

Maryory Astrid Gómez Botero

Julián Andrés Lenis Rodas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Materiales
Medellín, Colombia

2021

A Dios por brindarme esta oportunidad en mi vida y apoyarme a perseverar.

A mis padres, familia y pareja que me brindaron todo su apoyo y confianza incondicional en esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Maryory Astrid Gómez Botero y Julián Andrés Lenis Rodas por su asesoría y dirección para el desarrollo y culminación de este trabajo.

Al Ingeniero Germán Aranguren y Arquitecto Daniel Bonilla por la confianza y apoyo que me brindaron en esta etapa de mi vida.

A Concretos el Eje S.A.S por brindarme asesoría y un espacio en sus laboratorios.

A la Universidad de Antioquia por ser la Sede de todo el conocimiento adquirido en estos años.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3.OBJETIVOS	4
3.1 Objetivo General	4
3.2 Objetivos Específicos	4
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1 Reciclaje.....	5
4.1.1. Residuos domésticos	6
4.1.2. Residuos comerciales	6
4.1.3. Residuos institucionales	6
4.2 Métodos de reciclaje de plásticos	6
4.2.1. Reciclaje mecánico.....	7
4.3 Poliolefinas	9
4.3.1. Polietileno de baja densidad.....	10
4.4 Concreto u hormigón	11
4.4.1. Ventajas del concreto reforzado	12
4.4.2. Desventajas del concreto reforzado.....	13
4.5 Fibras	14
4.5.1. Clasificación de las fibras	15
4.5.2. Ventajas del uso de macro fibras sintéticas en el concreto	17
4.5.3. Aplicaciones de las macro fibras sintéticas.....	19
4.5.4. Normas actuales sobre el uso y métodos de ensayo de concreto reforzado con fibras.....	19
4.6 Fisuración.....	22
4.6.1. Mecanismos de fisuración en el concreto	22
4.6.1.1 Mecanismo de fisuración en el concreto por retracción plástica	23
4.6.1.2 Retracción por secado	24
5. METODOLOGÍA	26
5.1 Materiales Utilizados	26
5.1.1 Agregados y refuerzo	26

5.2	Diseño de mezcla	28
5.3	Procedimiento ensayo de compresión según la norma ASTM C39	29
5.3.1	Ensayo de compresión según la norma ASTM C39	30
5.4	Ensayo de flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios).....	31
5.5	Ensayo placas de retracción	32
5.5.1	Análisis comparativo del agrietamiento	33
5.6	Análisis SEM-EDS	34
5.6.1	Preparación de la muestra	34
6.	RESULTADOS	35
6.1.	Ensayos de compresión (ASTM C39) a cilindros de concreto.	35
6.2.	Ensayo de flexión (NTC 2871-99) a vigas de concreto.	36
6.3.	Análisis comparativo del agrietamiento placas de concreto	38
6.4.	Análisis morfológico y de interfaz mediante SEM.....	42
6.5.	Análisis elemental mediante EDS.....	44
6.6.	Viabilidad económica para reemplazo de malla electrosoldada	46
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
8.	REFERENCIAS	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas y químicas del polietileno de baja densidad. [12]	10
Tabla 2. Medidas del fisuramiento de placas de concreto sin refuerzo (blanco), con malla electrosoldada (malla) y con un refuerzo de macro fibra polimérica reciclada de polietileno de baja densidad 4 Kg/m ³ a las 24 horas.	38
Tabla 3. Precios por kilogramo de material polimérico reciclado en Colombia [28].....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de reciclaje mecánico [8].	8
Figura 2. Código de identificación de resinas de plástico [9].	9
Figura 3. Clasificación del proceso de reducción de tamaños [10].	9
Figura 4 . Estructura molecular del etileno o eteno y de polietileno [14].	11
Figura 5. Curva de carga vs deflexión del comportamiento de un concreto sin refuerzo y reforzado con macro fibras [20].	19
Figura 6. Curva tensión-deformación para pasta cementicea, mortero y hormigón [21]....	23
Figura 7. Fisuración típica por retracción plástica [22].	23
Figura 8. Fisuración del concreto provocada por la restricción por secado [21].	24
Figura 9. Fisuraciones del concreto y tiempos de ocurrencia [22].	25
Figura 10. Macro fibra proveniente del proceso de extrusión.	27
Figura 11. Formaleta de madera para placas de concreto.	28
Figura 12. Piscina de curado de cilindros de prueba a compresión (A), cilindro sometido a ensayo de compresión (B), cilindro reforzado con macro fibra LDPE-R, fallada.	30
Figura 13. (A) Viga de concreto reforzado con macro fibra LDPE-R, (B) piscina de curado de vigas para ensayo a flexión.	32
Figura 14. Elaboración de placas de concreto.	32
Figura 15. Placa Fibra, Placa Malla, Placa Blanco.	33
Figura 16. Análisis SEM de muestras de concreto.	34
Figura 17. Resistencia a la compresión.	36
Figura 18. Resistencia a la flexión.	37
Figura 19. Viga con macro fibra LDPE-R, fallada.	38
Figura 21. Losa de concreto sin refuerzo (blanco).	39
Figura 22. Losa de concreto con refuerzo de malla soldada fisurada.	40
Figura 23. Losa de concreto reforzada con macro fibra de LDPE-R	41
Figura 25. Micrografías SEM concreto sometido a compresión reforzado con 4Kg/m ³ de macro fibra a diferentes aumentos: (A) X500, (B) X2000, (C) X10000, (D) X110.	43
Figura 26. Micrografías SEM compatibilidad de la macro fibra polietileno de baja densidad en el concreto a diferentes aumentos (A) X11, (B) X35, (C) X50, (D) X5000.	44

Figura 27. Micrografía SEM de muestra a compresión de concreto con macro fibra luego de 28 días de curado (A), espectro de una de las regiones de la matriz cementante (B). 45

Figura 28. Micrografía SEM de la macro fibra de polietileno de baja densidad proveniente de una placa de retracción luego de 28 días de curado (A), espectro de la región cuadrada (B)..... 46

RESUMEN

En este trabajo se investigaron las propiedades de un concreto premezclado reforzado con macro fibras poliméricas. Las macro fibras se obtuvieron a partir de bolsas de polietileno de baja densidad recicladas (LDPE-R, por sus siglas en inglés), de estas se obtuvieron monofilamentos mediante un proceso de extrusión, luego éstos se mezclaron con el concreto en una proporción de 4 kg/m^3 . Además, se investigó el efecto de estas macro fibras sobre las propiedades mecánicas del concreto como la resistencia a la compresión y flexión, también se realizaron pruebas para la medición de la fisuración de placas de concreto reforzadas. Los resultados indicaron que la adición de las macro fibras condujo a una disminución de las resistencias tanto a flexión como a compresión. No obstante, en el caso de la fisuración, las macro fibras proporcionan un efecto positivo sobre la cantidad y longitud de fisuras. Por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) se observó una compatibilidad media entre fibra y concreto, y no se observa daño en las macro fibras por álcalis presentes en el concreto.

Palabras clave: concreto premezclado, macro fibras poliméricas, SEM, compresión, flexión, fisuración.

ABSTRACT

In this paper we investigated the properties of a premixed concrete reinforced with polymer macro fibers. The macro fibers were obtained from recycled low-density polyethylene bags (LDPE-R), monofilaments were obtained by an extrusion process and then mixed with the concrete in a proportion of 4 kg/m³. In addition, the effect of these macro fibers on the mechanical properties of concrete (i.e. compressive strength and flex) was also investigated and a proposed test for the measurement of cracking of reinforced concrete plates. The results indicated that the addition of the macro fibers led to a decrease in both flexural and compression strengths, in the case of cracking the macro fibers provide a positive effect on the amount and length of cracks. Scanning electron microscopy (SEM) shows a medium compatibility between macro fiber and concrete, no damage to the macro fibers is observed by alkalis present in the concrete.

Keywords: Premixed concrete, polymer macro fibers, SEM, compression, bending. Cracking.

1. INTRODUCCIÓN

Las mallas son arreglos planos de alambres de refuerzo lisos o corrugados, uniformemente espaciados en cada dirección formando geometrías cuadradas o rectangulares, se constituye en un recurso imprescindible en los procesos constructivos. Se utilizan como refuerzo en aplicaciones estructurales como losa de piso, canales, plateas de cimentación, prefabricados, losas macizas, muros de contención entre otros [1].

El polietileno en el concreto ha demostrado ser una mejor forma de utilizar los residuos plásticos y también ha aumentado la resistencia del concreto, al presentar una buena compatibilidad con el concreto y debido a la naturaleza plástica del polietileno, éste potencializa su ductilidad y es una de las alternativas más usadas en la actualidad, ya que con esto no sólo se mejoran las propiedades del material si no que se contribuye a mejorar el medio ambiente [2].

El material seleccionado (para el presente trabajo) como posible candidato para reemplazar las mallas electrosoldadas en el concreto es el polietileno de baja densidad reciclado (LDPE-R, por sus siglas en inglés), este material por su origen da a pensar a las personas que no es el idóneo para este fin por ser un desecho y que no presta las mismas propiedades que podría prestar un material 100% virgen. La intención de este proyecto es dar importancia al proceso de reciclaje y atribuir interés al uso de estos materiales. El reciclaje aparte de ser una alternativa al problema de la gran cantidad de residuos sólidos poliméricos que son llevados al botadero, permite reincorporar estos residuos a una nueva etapa productiva o aprovechable, llevando un debido proceso de los desechos poliméricos se podría presentar una reducción muy leve, casi imperceptible en sus propiedades mecánicas e incluso presentar las mismas características que en su estado virgen.

CONDICON S.A.S es una empresa de construcción, diseño y consultoría, conformada por un grupo interdisciplinario de profesionales en ingeniería y arquitectura, para el diseño, planeación y ejecución de obras civiles y urbanísticas, dirigida a mejorar la calidad de vida

y satisfacer las necesidades de la comunidad, la empresa está constituida hace 5 años y desde entonces viene trabajando con los métodos regulares o convencionales de construcción, el fin de este proyecto es implementar en la empresa una técnica moderna e innovadora en la implementación de otros materiales de refuerzo en placas de piso, al sustituir las mallas metálicas encontradas comúnmente con macro fibras de material polimérico reciclado.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los problemas generados por los desechos sólidos, son los polímeros debido a que la mayoría son desechables, de un solo uso y terminan como desechos sólidos en abundancia y por sus características físicas y químicas, son materiales muy duraderos y difíciles de degradar por los microorganismos, además son una fuente importante de gases de efecto invernadero, debido a la liberación de metano y etileno en el momento de su transformación a producto final. Con el fin de impactar positivamente al medio ambiente se desea implementar el código de las 3 R, Reciclar, Reducir y Reutilizar por ello las macro fibras poliméricas recicladas son una buena alternativa para sustituir las mallas electrosoldadas, pero ¿Qué son las mallas electrosoldadas?, pues bien estas mallas son hilos metálicos que han sido ligados a través de una soldadura eléctrica, formando un solo cuerpo enrejado, con estructura de malla, estas son utilizadas como refuerzo en aplicaciones estructurales, que permiten tener el control de la retracción por temperatura producto de la reacción exotérmica de fraguado del concreto y algunos cambios térmicos que ocurren en el sistema, otros problemas encontrados con estas mallas electrosoldadas se debe al alto costo que genera fabricar las mallas y a su difícil almacenamiento y manipulación, por eso en este proyecto se desea implementar macro fibras de polímero recicladas [3-5].

3.OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Evaluar un material reciclable para la sustitución de mallas electrosoldadas en el refuerzo del concreto en placas de piso.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar propiedades físicas de los agregados y fibras poliméricas con potencial aplicación como macro fibras de refuerzo para el concreto.
- Realizar un diseño de experimentos para una mezcla de concreto con y sin macro fibras de refuerzo.
- Caracterizar las propiedades mecánicas y morfológicas de las probetas después de su falla por compresión y pruebas de retracción.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Reciclaje

Según el Departamento Nacional de Planeación en Colombia se generan aproximadamente 11.6 millones de toneladas de residuos sólidos al año de los cuales sólo se aprovecha aproximadamente el 40% de éstos [6].

La innovación tecnológica ha causado que la composición de los desechos y las regulaciones gubernamentales cambie y han inducido en el camino al tratamiento de residuos sólidos, pasando de los rellenos sanitarios que son un área de tierra diseñada para el depósito de desechos sólidos en la tierra, de métodos de quema de residuos sólidos que sólo generan una mayor contaminación debido a la emisión excesiva de gases de efecto invernadero en la atmósfera, a un tratamiento selectivo y amigable con el medio ambiente como lo es el reciclaje que convierte desechos como el papel, cartón, vidrio, plásticos, entre otros en recursos valiosos y aprovechables [7].

El proceso de reciclaje se deriva de los residuos sólidos urbanos que comúnmente se conocen como residuos no peligrosos, estos residuos se clasifican en tres categorías dependiendo del sitio en donde son generados: Residuos domésticos, residuos comerciales y residuos institucionales [7].

4.1.1. Residuos domésticos

Los residuos domésticos son los que se generan en las residencias urbanas unifamiliar, multifamiliares, moteles, hoteles y algunas áreas de recreación o sociales de uso diurno. Esta categoría abarca del 55 al 65% del total de los residuos sólidos urbanos generados en una subcategoría que es también conocida como residuos pos consumo, por lo tanto, las viviendas son una fuente potencial de residuos sólidos [7].

4.1.2. Residuos comerciales

Los desechos comerciales incluyen los desechos generados en tiendas, restaurantes, almacenes de cadena, oficinas, entre otros. En el sector industrial por lo general los residuos sólidos son insignificantes debido a que muchas empresas manufactureras o transformadoras de materia prima gestionan sus residuos conocidos como residuos postindustria mediante reciclaje o eliminación en vertederos industriales [7].

4.1.3. Residuos institucionales

Los residuos institucionales comprenden los desechos de instituciones educativas como colegios, universidades, fundaciones y edificios públicos [7].

4.2 Métodos de reciclaje de plásticos

Existen tres métodos para el reciclaje de polímeros o plásticos como comúnmente se les conoce, el reciclaje mecánico, el reciclado químico y el reciclaje terciario. Dependiendo del nivel de contaminación de los polímeros al estar en contacto con sustancias orgánicas, inorgánicas u otras impurezas se selecciona uno de los tres métodos. El presente trabajo se enfocará en el reciclaje mecánico debido a que este método fue el idóneo para este proyecto de incorporación de macro fibras recicladas de polietileno de baja densidad.

4.2.1. Reciclaje mecánico

Entre los métodos de reciclaje, el mecánico posee ciertas ventajas como lo son su bajo costo y buena confiabilidad, este tipo de reciclaje no ocasiona un daño significativo en la estructura molecular de los polímeros.

El reciclaje mecánico se divide en reciclaje mecánico primario y secundario, dependiendo de la fuente de los residuos si son de pre-consumo o pos-consumo respectivamente. Los polímeros de desecho de fabricación previa al consumo suelen ser muy limpios y de una sola composición conocida y no requiere un tratamiento adicional, mientras que los polímeros pos-consumo requieren unos pasos complementarios.

Los pasos de este método se pueden apreciar en la Figura 1, una vez se recogen los residuos pos-consumo son llevados a una fábrica de recuperación de materiales, primero son pasados por una clasificación manual de residuos, la cual implica una identificación visual del tipo de polímero, generalmente los operarios encargados de esta función utilizan el código de identificación de la resina que clasifica los polímeros con una numeración del 1 hasta el 7 según la resina base de su fabricación como lo muestra la Figura 2. Además de este código los operarios se basan en el color, la morfología y la marca comercial del plástico, es una labor difícil que implica errores humanos por la dificultad que presenta diferenciar visualmente, sin embargo, no deja de ser un método atractivo y confiable. Segundo, una vez los residuos están clasificados pasan a un molino triturador, la trituración busca una reducción de tamaño con el fin de facilitar el transporte al disminuir el volumen de los residuos. Esta reducción de tamaños se clasifica en dos grupos, desintegración gruesa y desintegración fina, que se diferencian por ser trituración y molienda respectivamente, y conllevan a un tamaño de partícula diferente como lo muestra la Figura 3. Posteriormente el material triturado es llevado a una planta de lavado, esto se requiere para residuos que estén mezclados y sucios, el material triturado es introducido a unas piscinas con productos de desinfección y limpieza con varios ciclos para garantizar la pérdida máxima de contaminantes dentro del material. Más adelante se deja secar el material, este proceso se lleva a cielo abierto o con la ayuda de equipos especializados de secado rápido, una vez que

el material reciclado esté seco se lleva a una extrusora cuya función es el moldeado del polímero, y además ocurre el fundido del polímero, o en este caso como se trata de un material reciclado que ya posee una historia térmica, provocaría una refundición, dado que la refundición ocasiona una degradación en las cadenas poliméricas algunas veces se recomienda mezclar estos polímeros reciclados con material virgen para disminuir los efectos de la degradación. El proceso de extrusión fuerza al material a pasar por un dado que también es conocido como cabezal, este posee una geometría definida por medio del empuje y presión generado por el tornillo sin fin, al cual generalmente se le conoce como husillo, y se obtiene un producto con un perfil geométrico definido [7].

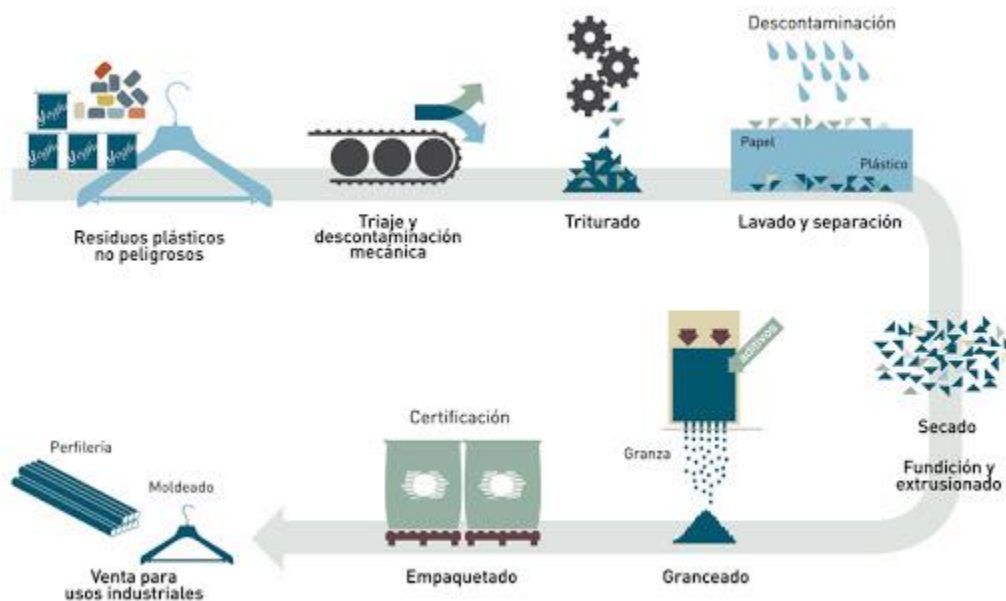


Figura 1. Esquema del proceso de reciclaje mecánico [8].



Figura 2. Código de identificación de resinas de plástico [9].

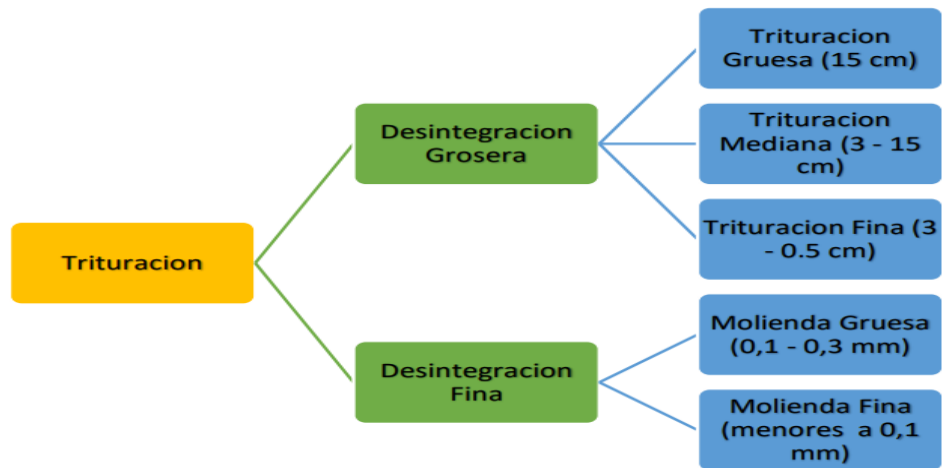


Figura 3. Clasificación del proceso de reducción de tamaños [10].

4.3 Poliolefinas

Actualmente en Colombia en diferentes zonas del país se comercializa una gran variedad de poliolefinas como PEHD (polietileno de alta densidad), PELD (polietileno de baja densidad), PP (polipropileno), PET (polietilentereftalato), entre otros.

4.3.1. Polietileno de baja densidad

El PE (polietileno) de baja densidad es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos, como el polipropileno y polietilenos. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. El polietileno en investigaciones se trata como un material semicristalino con excelente resistencia química, resistencia a la fatiga y al desgaste, estas propiedades se pueden apreciar en la Tabla 1, además, tiene una estructura muy simple [11].

Una molécula de PE es una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono como se puede observar en la Figura 4 [12]. También, son de peso ligero (0.97 gr/cm^3); proporcionan una buena resistencia a disolventes orgánicos con bajas tasas de absorción de humedad. Se demuestra que al añadir PELD (usualmente 2-6% en peso) muestra mayor compatibilidad con el concreto y el asfalto, además, condujo a la preparación del aglutinante del material compuesto con propiedades mecánicas mejoradas en un 21% en comparación con otras mezclas asfálticas convencionales [13].

Tabla 1. Propiedades mecánicas y químicas del polietileno de baja densidad. [12]

Módulo elástico	0.172 - 0.283 GPa
Coefficiente de Poisson	0.439 - 0.457
Resistencia mecánica a la compresión	10.8 - 17.4 MPa
Resistencia mecánica a la tracción	13.3 - 26.4 MPa
Tenacidad a fractura (K_{Ic})	1.21 - 3.39 MPa .m ^{1/2}
Resistencia a los ácidos	Tiene muy buena resistencia a los ácidos débiles y buena resistencia a los ácidos fuertes.
Resistencia a los álcalis	Tiene elevada resistencia a los álcalis, tanto fuertes como débiles.
Resistencia a los disolventes orgánicos	Media.

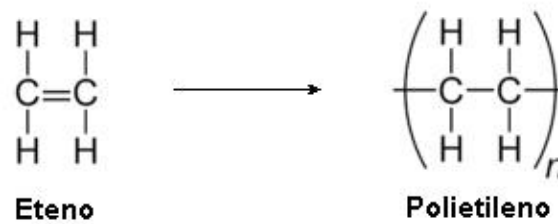


Figura 4 . Estructura molecular del etileno o eteno y de polietileno [14].

4.4 Concreto u hormigón

El concreto es una mezcla de arena, grava, roca triturada, u otros agregados provenientes de la explotación de fuentes naturales como depósitos fluviales o diversas canteras, estos son unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua. Algunas veces, uno o más aditivos son añadidos para cambiar ciertas características del concreto, como su ductilidad, durabilidad y tiempo de fraguado [15].

Como muchos de los materiales pétreos, el concreto tiene una alta resistencia a la compresión y una muy baja resistencia a la tensión que son sus principales características mecánicas. El concreto reforzado es una combinación de hormigón y acero, en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a la tensión que el concreto carece. El acero utilizado como refuerzo también es capaz de resistir fuerzas de compresión y se usa en columnas, vigas de cimentación y vigas aéreas, aunque su mayor propósito es contribuir a la resistencia a tensión a la que puede estar sometido el concreto [15].

El concreto fue usado por primera vez en Roma alrededor de la tercera centuria antes de Cristo. Estaba constituido por agregados unidos mediante un aglomerante conformado por una mezcla de cal y ceniza volcánica. Este material podía sumergirse en agua manteniendo sus propiedades a diferencia de los morteros de cal usados siglos antes en la antigua isla de Creta. La obra más grande erigida por los romanos fue el Panteón con su bóveda de 43.20 m de diámetro. El uso de este material en la construcción pasó al olvido con la caída del Imperio

y no fue sino hasta mediados del siglo XVIII que su uso se extendió nuevamente. El primer registro del uso de concreto en los tiempos modernos se remonta a 1760 cuando, en Inglaterra, John Smeaton descubrió, mientras proyectaba el faro Eddy Stone, que una mezcla de caliza calcinada y arcilla daba lugar a un conglomerante hidráulico resistente al agua [15].

4.4.1. Ventajas del concreto reforzado

El concreto reforzado seguramente es el material más importante para la construcción. Puede utilizarse en una u otra forma para diversas estructuras, grandes o pequeñas, en edificios, puentes, pavimentos, presas, muros de retención, túneles, instalaciones de drenaje e irrigación, tanques, entre otros.

El gran éxito de este material en la industria de la construcción puede entenderse fácilmente si se consideran sus numerosas ventajas. Algunas de éstas son las siguientes:

- Resistencia considerable a la compresión por unidad de costo en comparación con muchos otros materiales.
- El concreto reforzado tiene gran resistencia a las acciones del fuego y el agua y, de hecho, es el mejor material estructural que existe para los casos en que el agua esté presente. Durante incendios de intensidad media, los miembros con un recubrimiento adecuado de concreto sobre las varillas de refuerzo sufren sólo daño superficial sin fallar.
- Las estructuras de concreto reforzado son muy rígidas.
- Requiere de poco mantenimiento.
- Comparado con otros materiales, tiene una larga vida de servicio. Bajo condiciones apropiadas, las estructuras de concreto reforzado pueden usarse indefinidamente sin reducción en sus capacidades de carga. Esto puede explicarse por el hecho de que la

resistencia del concreto no disminuye con el tiempo, sino que en realidad aumenta con los años, debido al largo proceso de solidificación de la pasta de cemento.

- Es prácticamente el único material económico disponible para zapatas, losas de piso, muros de sótano, pilares y construcciones similares.
- Una característica especial del concreto es la posibilidad de colarlo en una variedad extraordinaria de formas que van desde simples losas, vigas y columnas, hasta grandes arcos y cascarones.
- En muchas regiones, el concreto se aprovecha para la elaboración de materiales locales baratos (arena, grava y agua) y requiere cantidades relativamente pequeñas de cemento y acero de refuerzo, las cuales puede ser necesario conseguir en otras regiones del país.
- Se requiere mano de obra de baja calificación para su montaje, en comparación con otros materiales, como el acero estructural.

4.4.2. Desventajas del concreto reforzado

Para usar con éxito el concreto, el contratista debe estar completamente familiarizado con sus puntos débiles, así como con sus puntos fuertes. Algunas de sus desventajas son las siguientes:

- El concreto tiene una resistencia muy baja a la tensión, por lo que requiere el uso de un refuerzo de tensión.
- Se requieren cimbras para mantener el concreto en posición hasta que se endurezca lo suficiente. Además, pueden requerirse obras falsas o apuntalamiento para apoyar la cimbra de techos, muros, pisos y estructuras similares hasta que los miembros de

concreto adquieren suficiente resistencia para soportarse por sí mismos. La obra falsa es muy costosa.

- La baja resistencia por unidad de peso de concreto conduce a miembros pesados. Esto se vuelve muy importante en estructuras de gran claridad, en donde el gran peso muerto del concreto tiene un fuerte efecto en los momentos flexionantes. Pueden usarse agregados ligeros para reducir el peso del concreto, pero su costo aumenta.
- Similarmente, la baja resistencia por unidad de volumen del concreto implica que los miembros serán relativamente grandes, lo que es de una considerable importancia en edificios altos y en estructuras de grandes claros.
- Las propiedades del concreto varían ampliamente debido a las modificaciones en su proporción y mezclado. Además, el colado y curado del concreto no son tan cuidadosamente controlados como la producción de otros materiales; por ejemplo, el acero estructural y la madera laminada [15].

4.5 Fibras

Históricamente las fibras han estado presentes en materiales estructurales como el concreto, adobe, tapia pisada, morteros de cal entre otros. En el antiguo Egipto se incorporaba paja a la masa arcillosa con la que se fabricaban los ladrillos para conferir una mayor resistencia, durabilidad y una buena manejabilidad después de ponerlas a cocción al sol.

Las fibras son un elemento presente en la construcción desde tiempos inmemorables, entre los casos más representativos se encuentran la pirámide Sakkara Egipto (2500 AC), Muros en la Mesopotamia (1400 AC), la muralla china (214 AC) y las Carreteras incas (214 DC) [16].

Las fibras vegetales son casi de carácter obligatorio en la tapia pisada gracias a que éstas ayudan a soportar las cargas a tensión y le confiere así un mayor monolitismo (no fisuración)

a los elementos. Están presentes en el material vegetal fibroso como plantas, resultado de la fotosíntesis.

La aplicación de fibras como un componente tiene un uso más común como aglomerante en tejas o prefabricados de asbesto con cemento, para este caso las fibras de asbesto le otorgan el monolitismo al material y una mayor resistencia a la tensión [16].

En la actualidad el uso de fibras se ha vuelto relativamente común y ha contribuido en gran parte al diseño y fabricación de estructuras arquitectónicas de grandes exigencias ya que disminuye el peso de las estructuras manteniendo o mejorando su resistencia estructural.

4.5.1. Clasificación de las fibras

Tomando como referencia la norma ASTM C 1116 (especificación estándar para concreto reforzado con fibras) que dicta que el criterio de clasificación para concreto reforzado con fibras según el tipo de material de la fibra incorporada, se presenta la siguiente clasificación [17].

Tipo I Fibra de acero: Contiene acero inoxidable, acero de aleación o fibras de acero al carbono (ver la Nota 1). NOTA 1-Las fibras de acero no se dañan fácilmente por los procesos de mezclado o proyección de concreto y las fibras de acero no recubiertas son químicamente compatibles con el ambiente normalmente alcalino dentro de la pasta de cemento. Algunos recubrimientos, como el aluminio, pueden ser perjudiciales para el concreto. Las fibras de acero al carbono se oxidan en condiciones que causan la oxidación del acero convencional, por ejemplo, en la porción cercana a la superficie del concreto sujeto a la carbonatación [17].

Tipo II Fibra de vidrio: Contiene fibras de vidrio resistentes a los álcalis. Las fibras de vidrio en hormigón o hormigón proyectado sometidas a humectación, atmósfera húmeda o contacto con suelo húmedo tienen el potencial de reaccionar con los álcalis presentes en la pasta de cemento, lo que debilita las fibras. También tienden a volverse frágiles debido a los productos de hidratación que penetran en los haces de fibras y llenan los espacios intersticiales entre

los filamentos de vidrio individuales. Ambos mecanismos causan reducciones en la fuerza, tenacidad y resistencia al impacto con la edad. Los tipos de fibra de vidrio resistentes a los álcalis (AR) desarrollados para uso con cemento son más resistentes a los álcalis que el E-glass y otros tipos no comercializados específicamente para uso en cemento, y deben usarse junto con técnicas establecidas para suprimir la reacción álcali-sílice, por ejemplo, el uso de un cemento de baja alcalinidad o una mezcla de minerales, o ambos. Sin embargo, incluso el uso de fibras de vidrio AR no previene el deterioro en el concreto reforzado con fibra de vidrio expuesto a la humedad durante un largo período de tiempo, pero solo ralentiza la velocidad a la que ocurre. [17]

Tipo III Fibras sintéticas: Contiene fibras sintéticas para las cuales se pueden producir pruebas documentales que confirmen su resistencia a largo plazo al deterioro cuando entran en contacto con la humedad y los álcalis presentes en la pasta de cemento o las sustancias presentes en aditivos que incorporan aire y sustancias químicas. Las fibras compuestas de algunos polímeros pueden deteriorarse al entrar en contacto con la humedad, los álcalis o algunos de los ingredientes de los aditivos químicos. Se ha demostrado que las fibras como las poliolefinas (polipropileno y polietileno), el nylon y el carbono son duraderas en el concreto. Cuando el comprador decida permitir el uso de fibras que no cumplan con las clasificaciones en la norma, por ejemplo: fibras naturales, fibras metálicas que no sean de acero, fibras de carbono, etc., el productor deberá presentar pruebas satisfactorias para el comprador. El tipo de fibra propuesta para el uso no reacciona negativamente con la matriz de hormigón o proyectado, incluidos los constituyentes de cualquier mezcla presente, o con el entorno circundante en la matriz agrietada, causando el deterioro de las propiedades mecánicas con la edad en las condiciones de exposición previstas en la aplicación [17].

Tipo IV Fibras naturales: Contiene fibras naturales de las que se puede presentar evidencia documental que confirme su resistencia al deterioro cuando entran en contacto con la humedad y los álcalis presentes en la pasta de cemento y las sustancias presentes en los aditivos durante la vida útil anticipada de la estructura. La clasificación, fibras naturales, se refiere a una población de fibras que se fabrican a partir de recursos fibrosos naturales y se utilizan por primera vez en el hormigón. Dependiendo de la materia prima inicial y del

proceso de fabricación empleado para producir la fibra, las propiedades físicas y químicas finales de la fibra en esta clasificación general pueden variar mucho. Algunas fibras naturales son susceptibles al deterioro por exposición a álcalis. El Método de prueba El D6942 puede usarse para determinar la susceptibilidad de estas fibras al deterioro como resultado de la exposición a los álcalis en el concreto. Por el contrario, muchos otros tipos de fibras naturales son altamente resistentes a los álcalis y pueden permanecer en el hormigón sin degradarse durante todo el ciclo de vida del producto [17].

La norma ASTM D7508 / D7508M (para hebras cortadas de poliolefinas, para uso en concreto) define como [18]:

- Fibra de macro poliolefinas a las fibras que tienen una densidad lineal mayor o igual a 580 denier (diámetro equivalente ≥ 0.3 mm).
- Fibra de micro poliolefinas a las fibras que tienen una densidad lineal inferior a 580 denier (diámetro equivalente < 0.3 mm).

4.5.2. Ventajas del uso de macro fibras sintéticas en el concreto

El uso de macro fibras sintéticas en una mezcla de concreto presenta las siguientes ventajas: [19].

- Controla y reduce la retracción y el fisuramiento causado por la dinámica plástica del concreto como se aprecia en la Figura 5.
- Incrementa la tenacidad a la flexión.
- Mejor capacidad de disipar energía.
- Reduce la segregación y la exudación.

- Geometría adaptable para generar un buen anclaje al concreto.
- Manipulación más segura y fácil que el acero.
- Químicamente inerte, resistente a los álcalis.
- Aislante eléctrico moderado. En placas de piso reduce el alabeo.
- Mayor resistencia al fuego.
- Elevada resistencia a la corrosión
- No es magnética.
- Reduce el desgaste de mangueras de bombeo y paredes del trompo mezclador.
- Se puede incorporar a la mezcla de concreto en seco o en húmedo.

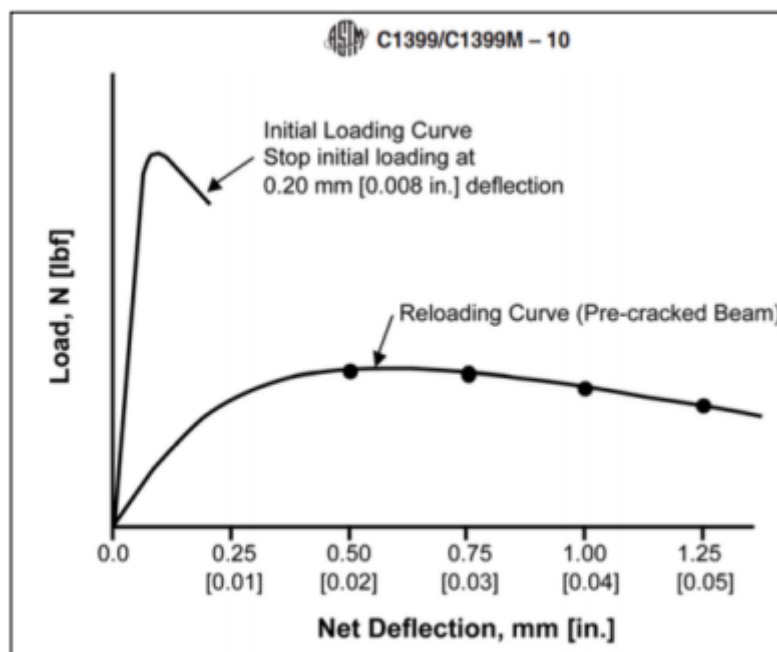


Figura 5. Curva de carga vs deflexión del comportamiento de un concreto sin refuerzo y reforzado con macro fibras [20].

4.5.3. Aplicaciones de las macro fibras sintéticas

Actualmente existen varias aplicaciones para este tipo de fibra en el mercado, las más representativas son:

- Pisos industriales, comerciales y residenciales.
- Concreto lanzado (reduce el rebote).
- Placas de entrepiso, sistema de lámina colaborante.
- Placas de entrepiso, sistema placa fácil.
- Pavimentos rígidos
- Prefabricados y concretos livianos.

4.5.4. Normas actuales sobre el uso y métodos de ensayo de concreto reforzado con fibras

ASTM C 1399 “Método de ensayo para determinar el esfuerzo residual promedio del concreto reforzado con fibra”: Esta norma es usada sobre todo para diseño de pisos en donde se determina el esfuerzo residual promedio (post-fisuración) luego de pre fisurar de manera controlada una viga de concreto fibroreforzado. No requiere una máquina de falla controlada por la deflexión de la viga (Circuito cerrado).

ASTM C 1609 “Método de ensayo para determinar el desempeño del concreto reforzado con fibra (Usando una viga cargada en los tercios)”: Este ensayo similar al descrito en la norma ASTM C 1399 no emplea una platina de apoyo sobre la cual pre-fisurar el material, la deformación post fisuración es medida gracias a que la aplicación de la carga es controlada por la deflexión del espécimen (Servo Controlado).

ASTM C 1550 “Método de ensayo para determinar la tenacidad a flexión del concreto reforzado con fibras (usando una carga central sobre un panel redondo)”: Este ensayo de origen australiano, es el equivalente a la norma EFNARC 14488- 5, solo que hay una mejor distribución de la carga un espécimen circular apoyado en tres puntos no restringidos y el panel cuenta con un espesor de 75 mm la deflexión de la viga (Circuito cerrado).

EN 14488-3 “Ensayos sobre concreto lanzado Parte 3: Resistencias a la flexión (Determinación de la resistencia al primer pico, del último y de la resistencia residual) de vigas de concreto reforzado con fibras”: Este ensayo corresponde al tercero de los procedimientos sobre concreto lanzado descrito por la norma EN 14488 (Norma Europea) tiene como limitación que requiere una vez más que la carga de la máquina sea controlada por la medida de la deflexión a medida que se carga una viga cargada en los tercios. No requiere una máquina de falla controlada por la deflexión de la viga (Circuito cerrado).

EN 14488-5 “Ensayos sobre concreto lanzado Parte 5: Determinación de la capacidad de absorción de energía de una placa de concreto reforzado con fibras”: Esta norma expone el ensayo original de absorción de energía EFNARC, que obtiene sobre un espécimen cuadrado sobre el que una curva Carga vs. Deflexión a partir de la cual se calcula un valor de energía la deflexión de la viga (Circuito cerrado).

EN 14889-1 “Fibras para concreto- Parte 1- Fibras de acero- especificaciones Y conformidad”: Al igual que la parte 2 (sintéticas) esta norma europea establece las definiciones de los diferentes grupos de fibras de acero (I-V) de acuerdo a su proceso de fabricación. Define y enumera las propiedades más importantes de las fibras, así como sus tolerancias.

EN 14889-2 “Fibras para concreto- Parte 2 - Fibras de polímeros o sintéticas, Especificaciones y conformidad”: Esta norma europea define cuatro tipos de fibras (Clase I, II, III y IV) dependiendo de la función para la cual están destinadas. Establece igualmente las variaciones aceptables en dimensiones como en las propiedades en las fibras. Define la relación de aspecto (diámetro/ longitud) y para las fibras con sección diferente a la circular permite el cálculo de un diámetro equivalente.

IIS-SF4. “Método de ensayo para determinar la tenacidad del concreto reforzado con fibra”: Este ensayo se efectúa sobre la viga simplemente apoyada sobre la que determina el parámetro RE, 3 resistencia residual a 3mm de deflexión. Parámetro muy usado en el diseño de pisos.

NTC 5541 “Concretos reforzados con FIBRAS”: Constituye en la norma general de fibras, con las definiciones y clases generales de reforzamiento con fibras, igualmente, lista las propiedades del concreto modificadas por la inclusión de las fibras. Así como señala las recomendaciones de mezclado, transporte y manipulación de un concreto reforzado con fibras. Establece igualmente las tolerancias de variación sobre las propiedades más importantes de los concretos reforzados con fibras.

NTC 5721 “Método de ensayo para determinar la capacidad de absorción de energía (tenacidad) de concreto reforzado con fibras” (EFNARC): Esta norma describe en detalle el procedimiento de ensayo mencionado en las “Especificaciones para Contratistas” de la EFNARC, donde se mide sobre una placa cuadrada de 100 mm de espesor y 600 mm de lado la tenacidad del concreto reforzado con fibra. Su aplicación principal se encuentra sin duda sobre el concreto lanzado. El ensayo se concentra en determinar la curva Carga vs. Deflexión de estas probetas provenientes de campo, constituyéndose en un ensayo sobre un elemento de similares dimensiones que la estructura misma. Esta norma permite evaluar no solamente el cumplimiento frente a una especificación sino además comparar el desempeño entre diferentes tipos de fibras.

4.6 Fisuración

Las fisuras pueden establecer importantes defectos estructurales, además de afectar la estética de algunas edificaciones o estructuras. Existen varias causas específicas de fisuración.

4.6.1. Mecanismos de fisuración en el concreto

Las fisuras juegan un papel crucial en la respuesta a cargas del concreto, tanto en compresión como en flexión, estudios científicos del comportamiento microscópico del concreto a compresión mostraron que la respuesta tensión-deformación del concreto está ligada fuertemente a la formación de micro fisuras, es decir, fisuras que se forman en los bordes de los agregados gruesos y se propagan alrededor del mortero circundante, la Figura 6 muestra las resistencias a tensión de una pasta de cemento, concreto y hormigón todos estos llevan la misma relación agua-cemento. Durante las primeras investigaciones sobre el tema se creía que el concreto estaba compuesto por dos materiales pasta cementicea y agregados, pero hoy en día los avances en investigación como en tecnología han permitido generar nuevos materiales para ser utilizados como agregados del concreto como acelerantes, anti soles, catalizador, retardantes, fibras naturales, sintéticas etc, ampliando así la composición de la mezcla del concreto y las microfisuras eran consideradas la principal causa del comportamiento no lineal de la relación tensión deformación en compresión. Este comportamiento depende de la pasta del cemento que es un material de ablandamiento no lineal y del mortero constructivo del hormigón [21].

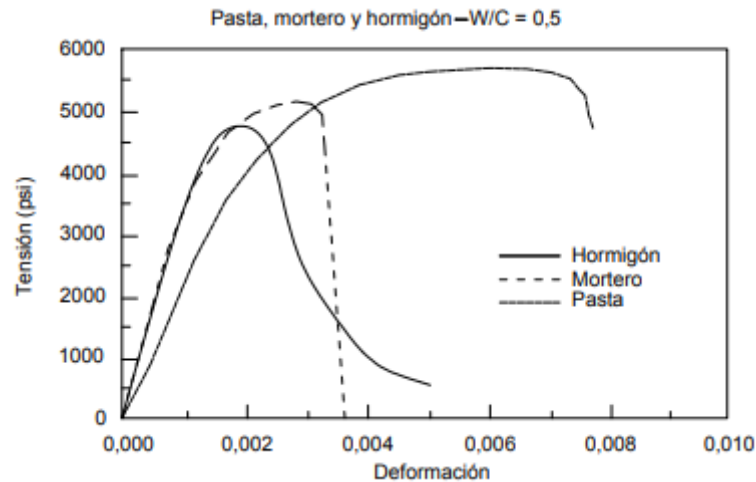


Figura 6. Curva tensión-deformación para pasta cementicia, mortero y hormigón [21].

4.6.1.1 Mecanismo de fisuración en el concreto por retracción plástica

La fisuración por retracción plástica ocurre cuando el concreto está sujeto a una pérdida de humedad muy rápida provocada por una combinación de factores que incluyen las temperaturas del aire y el hormigón, la humedad relativa y la velocidad del viento en la superficie del hormigón. Estos factores pueden combinarse de manera que provocan niveles altos de evaporación superficial tanto en clima caluroso como en clima frío.



Figura 7. Fisuración típica por retracción plástica [22].

4.6.1.2 Retracción por secado

Es una de las causas más habituales de fisuración en el concreto, aparece por la restricción (encofrado) por secado, es decir, provocado por la pérdida de humedad de la pasta de cemento, la cual se puede contraer hasta un 1 %. Afortunadamente los agregados poseen una restricción interna que reduce la magnitud de este cambio de volumen en aproximadamente 0,06 %. La combinación de retracción y restricción desarrolla tensiones de tracción dentro del hormigón. Debido a la baja resistencia a la tracción inherente al hormigón, con frecuencia habrá fisuración como lo muestra la Figura 8.

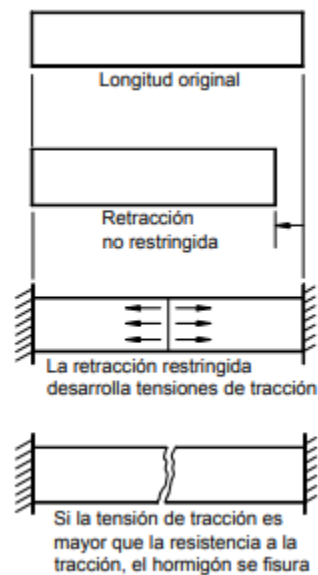


Figura 8. Fisuración del concreto provocada por la restricción por secado [21].

El hormigón al secarse se encoge o se retrae y al mojarse se expande, pero el grado de expansión no es tan grande como el de retracción. Estos cambios de volumen, junto con los cambios del contenido de humedad, constituyen una característica inherente al concreto de cemento hidráulico. El cambio de contenido de humedad de la pasta cementicia también hace que el concreto se retraiga. Los agregados reducen el volumen unitario de la pasta cementicia y proporcionan una restricción interna que reduce significativamente la magnitud de estos cambios volumétricos en el concreto [21].

La Figura 9 muestra el tipo de fisuración del concreto en función del tiempo de ocurrencia de las fisuraciones. La figura abarca las diversas causas de fisuración en el concreto, siendo la retracción plástica y la retracción por secado las causas típicas de fisuración en el concreto.

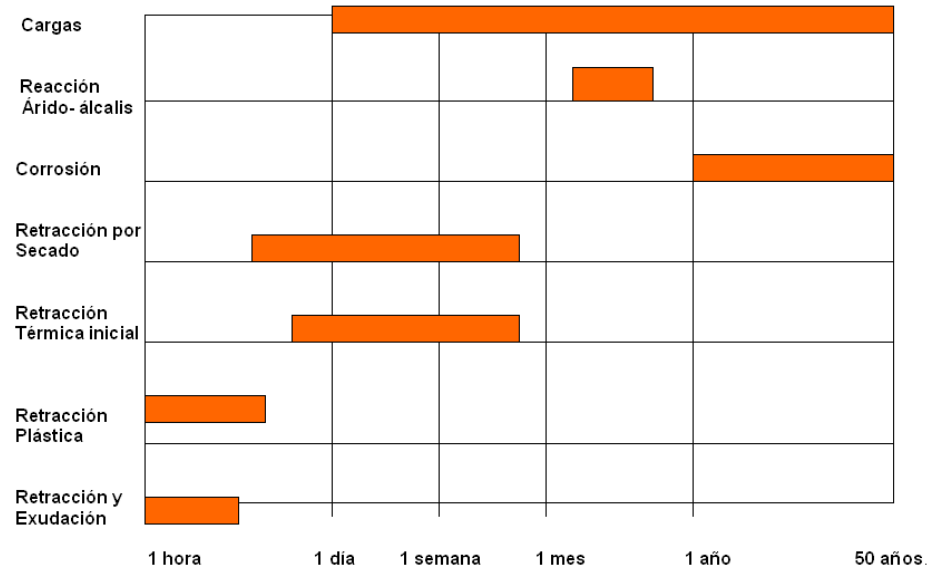


Figura 9. Fisuraciones del concreto y tiempos de ocurrencia [22].

5. METODOLOGÍA

5.1 Materiales Utilizados

5.1.1 Agregados y refuerzo

Los agregados utilizados en el presente estudio fueron caracterizados en el laboratorio de Concreto el eje S.A.S. ubicado en la Virginia (Risaralda), para realizar el diseño de mezcla, obteniéndose los siguientes resultados.

- Arena para concreto proveniente del río Risaralda. Los datos fueron obtenidos según las siguientes normas: INV E-222 “Gravedad Específica Y Absorción De Agregados Finos”; INV E500-13. Normas y especificaciones INVIA “Ensayo Granulometría De Agregado Grueso Para. Concreto Hidráulico” y NTC 92 “determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados” [23,24,25].

- Porcentaje de Absorción 3.77
 - Peso unitario compacto seco 1537 Kg/m³
 - Peso unitario suelto seco 1319 Kg/m³
 - Humedad natural (%W) 7.5%
 - Módulo de finura 3.26
 - Densidad 2.65 Kg/L
- Triturado para concreto 1” proveniente de Cañaveral.
 - Porcentaje de Absorción 2
 - Tamaño máximo 1”
 - Tamaño mínimo ¾”
 - Peso unitario suelto seco 4097 Kg/m³
 - Peso unitario compacto seco 1537 Kg/m³

- Humedad natural (% W) 0,57
 - Densidad 2.70 Kg/L
-
- Macro Fibra de polietileno de baja densidad reciclada con un diámetro promedio de 3 mm y una longitud aproximada de 40 mm según la norma ASTM D7508 / D7508M (para hebras cortadas de poliolefinas, para uso en concreto) estas se clasifican como macro fibras, proveniente de un proceso de extrusión y de la recuperación de bolsas de basura, Figura 10. Las macro fibras poseen una densidad de 0.91g/cm^3 , una resistencia a la tracción de 15 MPa y un índice de fluidez (MFI) de 2, datos proporcionados por la empresa BIOPLAST S.A.S. quién las suministró.



Figura 10. Macro fibra proveniente del proceso de extrusión.

- Cemento: Portland tipo I, de uso general, adquirido en cemento Alión, fabricado en la planta de cementos de rio claro (Antioquia) con certificado de calidad NTC 121.
- Aditivos: Plastificante (masterset R790) y superplastificante (glenium 357)
- Formaleta de madera fabricada a mano de medidas $500 \times 500 \times 30$ mm Figura 11. Con el fin de medir la retracción del concreto, estas dimensiones buscan una relación área/volumen alto para elevar el proceso de retracción, además de ser similar a la utilizada en losas de piso.



Figura 11. Formaleta de madera para placas de concreto.

5.2 Diseño de mezcla

El diseño de mezcla se formuló a partir del elemento que se quiere vaciar el cual fueron las placas de piso, por lo que se utilizó una resistencia de diseño (f'_c) de 3000 psi y un asentamiento de 5".

Se utilizó un triturado con tamaño máximo de partícula de 1" debido a que este es el tamaño de agregado que se utiliza cuando se va a vaciar este elemento. Se buscó tener una buena cantidad de agua que ayude a la retracción por lo que se utilizó una relación agua/cemento (A/C) de 0.62.

La dosificación de la mezcla para un concreto de 3000 psi y un asentamiento de 5" fue:

- Arena 65,9 Kilogramos
- Triturado 69,28 Kilogramos
- Cemento 21 Kilogramos
- Agua 9 Litros
- Macro fibra LDPE-R 4 Kg/m³

Este diseño de mezcla se utilizó para la realización de los ensayos a compresión, flexión y para las placas de retracción.

5.3 Procedimiento ensayo de compresión según la norma ASTM C39

La preparación de la mezcla se realizó teniendo en cuenta primero el contenido de agua que pueda tener la arena, para esto se realizó la prueba de humedad de la arena, que es la que en este caso tiene un aporte significativo de agua, luego de esto se procedió al pesaje de los materiales en básculas (calibradas por la empresa), para luego ser mezclados por un tiempo de tres minutos hasta tener una consistencia adecuada.

Después de este tiempo se tomó parte del concreto, para pasar a la prueba de asentamiento (verificación de la fluidez de acuerdo al diseño) según la norma NTC 396 “Ensayo De Asentamiento Del Concreto” y luego de cumplir con este parámetro se procedió a la fabricación de las probetas según la norma se vació el concreto en cilindros de dimensiones de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura [26].

Este procedimiento es repetitivo para el ensayo a flexión con la diferencia de las dimensiones del molde que son 150x150x500 mm³.

Se prepararon cilindros que permanecieron en su molde por 5 horas, luego de desmoldarlos fueron introducidos en un tanque de curado por un tiempo de 7, 14 y 28 días, al cabo del cual se retiraron dejándolos secar por espacio de una hora bajo condiciones de temperatura y humedad de cuarto para disipar la presión de poros según la norma ASTM C293.

- Los cilindros con una dosificación de 4 Kg/m³ de macro fibra de LDPE-R se evaluaron a los 7, 14 y 28 días de edad mediante pruebas de compresión, flexión. Cada evaluación se realizó por triplicado.
- Los cilindros de concreto normal (sin macro fibras) que se llamarán “Blanco”, se evaluaron a los 7, 14 y 28 días de edad También mediante pruebas de compresión, flexión. Cada evaluación se realizó por triplicado.

5.3.1 Ensayo de compresión según la norma ASTM C39

En el caso de los ensayos para determinar la resistencia a compresión según la norma ASTM C39, “Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto”. Los ensayos fueron realizados por el laboratorio Concretos eje, se utilizó máquina de ensayo a compresión (MATLIM PC_F_01), con una tasa de carga máxima de 135 KN y una velocidad de carga de 0.2500 MPa/seg en condiciones de ambiente normales y calibrada el 07 de Julio del 2020.

La Figura 12 (A) muestra la piscina de curado de los cilindros de prueba a compresión que se utilizó para mejorar la hidratación del cemento y minimizar la retracción, la Figura 12 (B) muestra la disposición de uno de los cilindros en la máquina de ensayo a compresión, este presenta un desprendimiento en la parte inferior izquierda del cilindro ya que la imagen fue tomada en el transcurso del ensayo. La Figura 12 (C) muestra uno de los cilindros ya fallado reforzado con 4 Kg/m³ de macro fibra LDPE-R, en la imagen se puede apreciar la aparición de algunas macro fibras sobre la superficie de fractura.

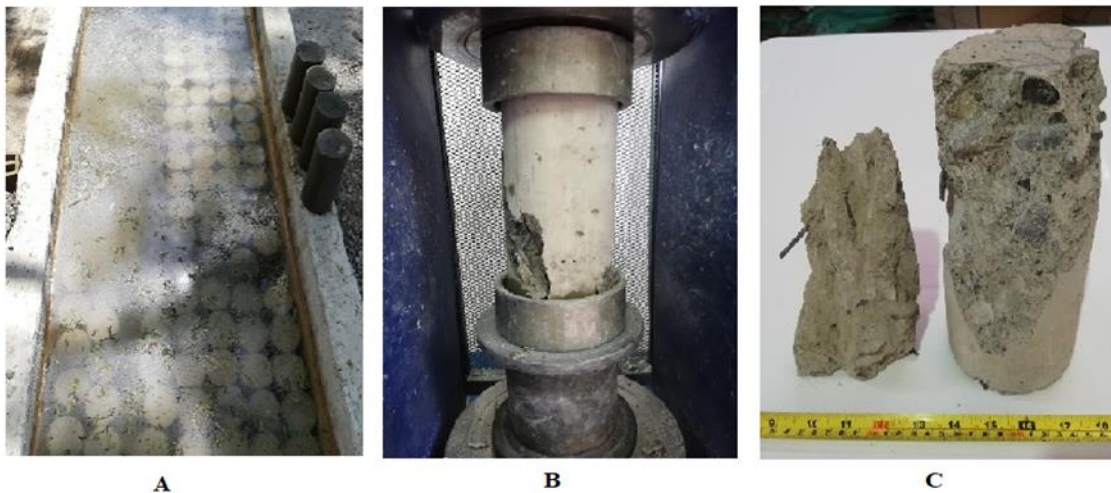


Figura 12. Piscina de curado de cilindros de prueba a compresión (A), cilindro sometido a ensayo de compresión (B), cilindro reforzado con macro fibra LDPE-R, fallada.

5.4 Ensayo de flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)

En el caso de los ensayos para determinar la resistencia a la flexión según la norma NTC 2871-99, “Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión” se utilizó máquina de ensayo a compresión (MATLIM PC_F_01). Con una tasa de carga máxima de 31.10 KN y una velocidad de carga de 0,2500 MPa/seg. Se realizó el mismo procedimiento que en el ensayo anterior. A excepción que los elementos a vaciar en este ensayo son vigas de medidas 150x150x500mm.

Se prepararon:

- Vigas con una dosificación de 4 Kg/m³ de macro fibra de LDPE-R evaluados a los 7, 14 y 28 días de edad. Cada evaluación se realizó por triplicado.
- Vigas de concreto normal (sin macro fibras) que se llamarán “Blanco”, evaluadas a los 7, 14 y 28 días de edad. Cada evaluación se realizó por triplicado.

la Figura 13 (A) muestra el material compuesto fabricado, viga de concreto reforzado con macro fibra LDPE-R, la viga presenta un buen terminado, pero se aprecia porosidades en la superficie de la viga por lo que se recomienda vibrar mejor las vigas en húmedo. La Figura 13 (B) muestra la piscina de curado de las viguetas de prueba a flexión que es utilizada para mejorar la hidratación del cemento y minimizar la retracción y aparición de fisuras.



A



B

Figura 13. (A) Viga de concreto reforzado con macro fibra LDPE-R, (B) piscina de curado de vigas para ensayo a flexión.

5.5 Ensayo placas de retracción

Se elaboraron de placas de concreto con dimensiones de 500×500×30 mm utilizando moldes de madera, para este ensayo no existe una norma que rige el procedimiento para este tipo de ensayo por tal motivo en este proyecto se adoptó la propuesta de ensayo realizado por Juan Pablo Bolívar Usme en el proyecto “Estudio De Concreto Reforzado Con Fibras De Polietileno/Polipropileno En La Empresa Concreto S.A.”. Con el fin de medir la retracción del concreto, estas dimensiones buscan una relación área/volumen alto para elevar el proceso de retracción, además de ser similar a la utilizada en losas de piso [27].

La mezcla de concreto se ejecutó con el mismo diseño de mezcla de los ensayos de flexión y compresión y se realizó en un trompo de mezclado el cual se limpió y adecuó antes de realizar la combinación.

Las diferentes materias primas se vertieron como lo muestra la Figura 14.

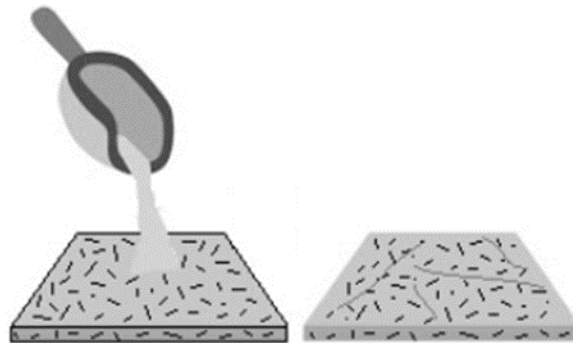


Figura 14. Elaboración de placas de concreto.

Se elaboraron:

- Placa Blanco: placa que contiene concreto sin reforzar
- Placa Malla: placa que contiene refuerzo de malla electrosoldada

- Placa Fibra: placa que contiene refuerzo de macro fibra LDPE-R

El concreto se agregó en las formaletas de madera de la siguiente manera: se vertió el concreto en dos capas, la primera capa de un espesor aproximado de 1,5 cm, sobre esta se depositaron las macro fibras y malla respectivamente. Este ensayo se hizo por triplicado para cada una de las placas definidas anteriormente. El tiempo de fraguado de las placas fue de aproximadamente 4 horas, la Figura 15 muestra una representación de cada una de las placas que se elaboraron.

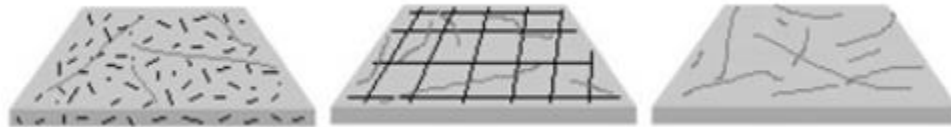


Figura 15. Placa Fibra, Placa Malla, Placa Blanco.

5.5.1 Análisis comparativo del agrietamiento

El análisis consiste en una inspección visual de un área de concreto determinada aleatoriamente para cada placa.

Para el cálculo del porcentaje de fisuramiento por retracción se utilizó la ecuación:

$$\% \text{ fisuramiento} = \frac{\text{Area de fisuramiento (M/FP)}}{\text{Area de fisuramiento B}} * 100$$

Siendo: M: El área de fisuramiento correspondiente a la malla electrosoldada

FP: El área de fisuramiento correspondiente a la macro fibra polimérica

B: El área de fisuramiento correspondiente al blanco de concreto sin refuerzo

5.6 Análisis SEM-EDS

Para este análisis se utilizó el equipo de microscopía electrónica de barrido (JEOL JSM-6490LV) ubicado en la sede de investigación universitaria de la Universidad de Antioquia, se utilizaron muestras de concreto reforzadas con macro fibra para verificar afinidad química de las macro fibras poliméricas con el concreto y su posible deterioro por los álcalis del concreto y el empleo de electrones retro dispersados y análisis elemental mediante sonda EDS, sobre una macro fibra para obtener un mapeo de composición.

5.6.1 Preparación de la muestra

Primero se cortó la muestra en medidas de $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ de un cilindro fallado por compresión y una placa de retracción reforzada con macro fibra LDPE-R, posteriormente estas muestras cortadas se llevaron a una cámara de alto vacío durante 24 horas, después se les dio un recubrimiento en oro por evaporación y después fueron llevadas al microscopio electrónico de barrido.

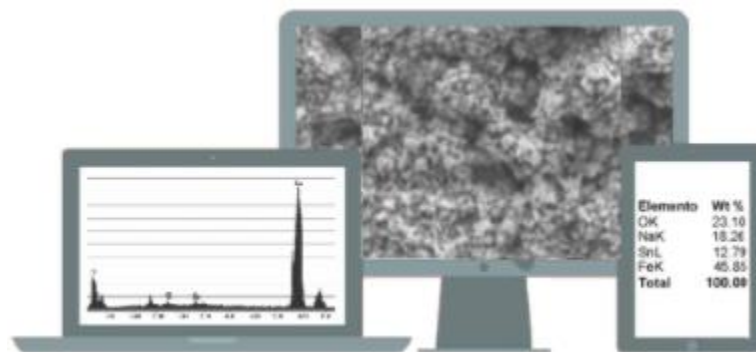


Figura 16. Análisis SEM de muestras de concreto.

6.RESULTADOS

6.1. Ensayos de compresión (ASTM C39) a cilindros de concreto.

En la Figura 17 se presentan los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla obtenida, se puede observar que, con el aumento del tiempo, tanto el Blanco (línea azul) como el reforzado con macro fibras (línea naranja) presentan una mejor resistencia a la compresión, es decir, que, en este caso, este tipo de material compuesto cumpliría con los requerimientos de resistencia específica (3000 psi). Teniendo un mejor comportamiento el blanco y un crecimiento lineal a medida que avanza el tiempo (7, 14, 28 días). El concreto reforzado con macro fibras de LDPE-R, presenta una buena resistencia a la compresión por un periodo de curado de 28 días siendo aceptable para la realización de estructuras con este concreto por cumplir con la resistencia de diseño. La razón por la que disminuyó su resistencia con las macro fibras se pudo deber a que el concreto blanco fue el que soportó la carga axial del ensayo ya que la resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto. Puede que un periodo más largo o una forma diferente de macro fibras o la orientación de éstas, pueden ayudar al aumento de esta resistencia en los ensayos futuros es por esto tan relevante realizar el ensayo de compresión, ya que los resultados obtenidos se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada ($f'c$). Se podría llegar a inferir que debido a una baja adherencia de las macro fibras con el concreto estas actuarían como concentradores de esfuerzo y facilitarían la falla de los cilindros a compresión. También es aceptado que las macro fibras dentro del concreto no trabajan para mejorar su resistencia a compresión, sino su resistencia a flexión y tracción, por lo que este ensayo no arrojó una mejora con las macro fibras.

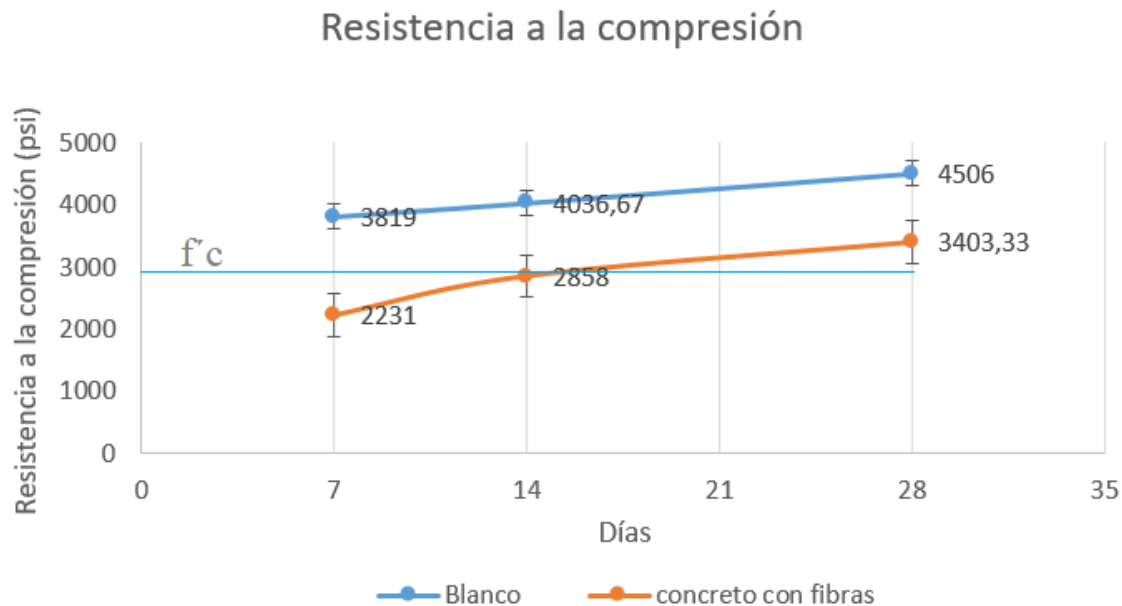


Figura 17. Resistencia a la compresión.

6.2. Ensayo de flexión (NTC 2871-99) a vigas de concreto.

En la Figura 18 se puede observar el comportamiento tanto del blanco, como el concreto con macro fibra, los dos tipos de concreto presentan mejoras en los resultados de módulo de rotura conforme avanzan en el tiempo, el cual fue medido a los 7, 14 y 28 días. De acuerdo al paso del tiempo se pudo observar que, aunque la resistencia de los dos tipos de concreto avanzaba, el concreto reforzado con macro fibras tenía menores valores de resistencia a la rotura que el blanco, este caso se presentó en las tres ocasiones evaluadas, esto puede ser causado a que este concreto reforzado con macro fibra LDPE-R, presenta convencionalmente menor tenacidad a un concreto reforzado con acero, además la geometría de las macro fibras también juega un papel determinante en estos casos al igual que en los resultados a compresión por tratarse de macro fibras . Otro parámetro que posiblemente influyó en el comportamiento a flexión del concreto reforzado con macro fibras es la longitud de esta, ya que una macro fibra con mayor longitud abarcaría mayor área de contacto con el concreto y así tendría un mayor anclaje, la longitud de anclaje de la macro fibra dentro del concreto; para este proyecto fue de 40 mm de longitud y 3 mm de diámetro. La baja afinidad entre la

macro fibra y la matriz, esto podría explicar la poca adherencia y el arrancamiento súbito de la matriz cementante. Esta resistencia a la flexión se midió en MPa y aunque a los 28 días el concreto con macro fibras presentó un valor de 4,42 MPa y no 6,15 MPa como el concreto solo, presentó buenas características y un buen comportamiento al ensayo.

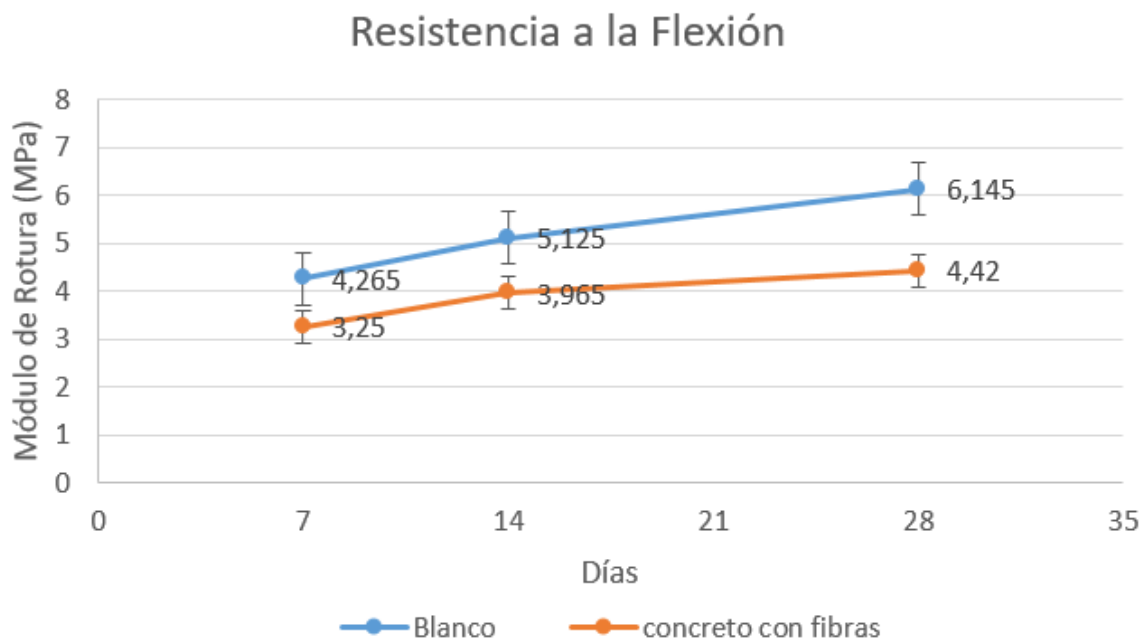


Figura 18. Resistencia a la flexión.

En la Figura 19 se muestra una viga fallada reforzada con macro fibra LDPE-R, se puede observar que no aparecen fisuras en la parte cercana a la fractura, la viga fracturó en una zona cercana al punto medio, estas fracturas se dan en la zona más débil del concreto, por medio de una inspección visual en la zona de fractura se pudo observar que la presencia de macro fibras en esta zona fue menor, por lo que no se puede atribuir la falla súbita a la presencia de estas.



Figura 19. Viga con macro fibra LDPE-R, fallada.

6.3. Análisis comparativo del agrietamiento placas de concreto

Las medidas de fisuración se realizaron después de 24 horas de vaciado el concreto. Las fisuras se midieron mediante un pie de rey con una precisión de 0,1 mm. Las medidas de las fisuras se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2. Medidas del fisuramiento de placas de concreto sin refuerzo (blanco), con malla electrosoldada (malla) y con un refuerzo de macro fibra polimérica reciclada de polietileno de baja densidad 4 Kg/m³ a las 24 horas.

Placa	Ancho de fisura (mm)		Longitud de fisura (mm)		Área de fisuramiento	% Fisuramiento
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ		
Blanco	0,986	0,171	235,5	48,537	232,203	100%
Malla	0,198	0,106	307,6	37,773	60,9048	26%
Macro fibra LDPE-R	0,09	0,006	170	22,733	15,3	7%

Las losas de concreto sin refuerzo presentaron el mayor fisuramiento se observa en la Figura 21 y se atribuye a la retracción hidráulica después del fraguado del concreto, esta losa fue la que mayor exudación presentó en su superficie, el fisuramiento ocurre de manera rápida, el ancho, largo y profundidad de fisura se intensificó a medida que la losa se mostraba más sólida, dando origen e inicio de la retracción por secado que es una causa habitual de la

fisuración del concreto provocada por la pérdida de humedad de la pasta de cemento, la cual se puede retraer en un 1%, para contrarrestar este efecto se puede añadir mayor cantidad de los agregados y reducir la cantidad de agua.



Figura 20. Losa de concreto sin refuerzo (blanco).

Las losas de concreto reforzadas con malla electrosoldada presentan exudación similar a la del blanco en la superficie de la losa, además de presentar el mismo patrón de aparición de fisuras. Estas mallas son muy propensas a corroerse y las mallas utilizadas para este ensayo presentan un estado relativamente elevado de corrosión y esta corrosión del acero produce óxidos e hidróxidos de hierro, cuyo volumen es mucho mayor que el del hierro metálico original. Este aumento en el volumen provoca tensiones radiales de estallido alrededor de las barras de armadura como se puede apreciar en la Figura 22, y por consiguiente aparición de fisuras radiales localizadas. Estas fisuras radiales se pueden propagar a lo largo de la barra, provocando la formación de fisuras longitudinales (es decir, paralelas a la barra) o provocando el descascaramiento del hormigón como se puede ver en una de las losas de concreto con refuerzo de malla Figura 23.

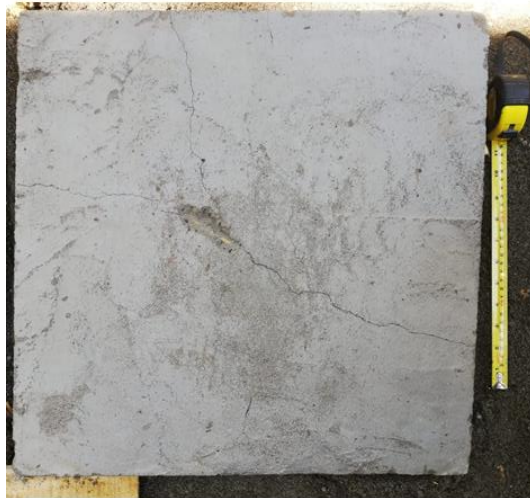


Figura 21. Losa de concreto con refuerzo de malla soldada fisurada.

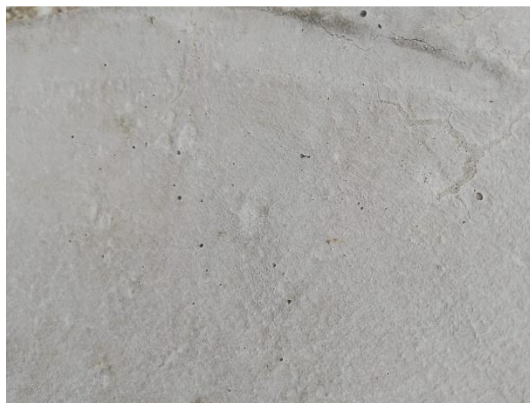


Figura 23. Acercamiento losa de concreto reforzado con malla electrosoldada, descascamiento radial de la superficie.

Las losas de concreto reforzadas con macro fibras LDPE-R con una proporción de 4 Kg/m^3 fueron las que menor exudación y aparición de fisuras presentaron, como se muestra de manera más gráfica en la Figura 24 estas mostraron un porcentaje menor, del 7%, en la cual el blanco presenta un porcentaje del 100% ya que este fue la base de referencia y el que posee malla electrosoldada presentó el 26%. Las losas reforzadas con macro fibras presentan fisuras de poca profundidad y longitud posiblemente debido a que las macro fibras sirven de puente de fisuramiento e inhiben la propagación de grietas en el concreto, al tratarse de macro fibras poliméricas no existe la posibilidad de generar tensiones de origen térmico lo que es una ventaja de este tipo de material, las diferencias de temperatura al interior de una estructura

de concreto permiten cambios diferenciales de volumen y si estos cambios superan la capacidad de deformación por tracción del concreto, éste se fisurará.



Figura 22. Losa de concreto reforzada con macro fibra de LDPE-R

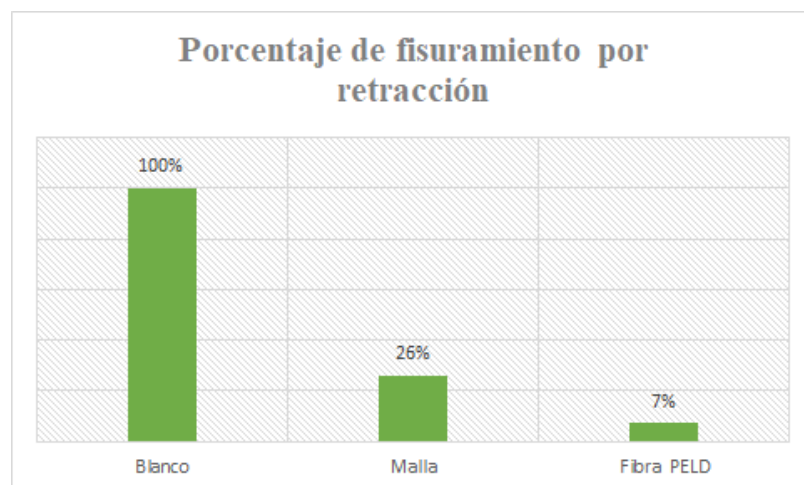


Figura 24. Porcentaje de fisuración por retracción de losas de concreto tomando como blanco la mezcla de concreto sin refuerzo.

6.4. Análisis morfológico y de interfaz mediante SEM

Mediante la realización de la microscopía electrónica de barrido SEM se lograron obtener imágenes detalladas de la interacción de las macro fibras con la pasta cementante la cual genera porosidad y fallas en el concreto, también se observó la morfología y fases del concreto tanto en placas de retracción como en probetas falladas por compresión luego de los 28 días de curado.

La Figura 25 corresponde a micrografías SEM de concreto sometido a compresión reforzado con 4Kg/m^3 de macro fibra LDPE-R, en la Figura 25 (A) se puede apreciar poca homogeneidad y el desprendimiento casi total del agregado, lo que infiere poca interacción entre el agregado y la pasta cementante o tal vez se deba a desprendimiento causado por el ensayo a compresión. En la Figura 25 (B) se puede observar fisuramiento en la pasta cementante lo que sugiere una falta de hidratación de la pasta de cemento. En La figura 25 (C) se muestran las fases del cemento, la portlandita se presenta en forma hexagonal la ettringita en forma alargada y el gel de torbemorita es la fase amorfa, fases comunes en la composición del cemento, compuestos que se originan luego de la hidratación del cemento. En la Figura 25 (D) se puede observar las marcas debidas a desprendimiento de los agregados, evidencia de una baja unión mecánica, además, se pueden apreciar micro fisuras con una longitud aproximada de 300 micrómetros, las cuales pudieron ser ocasionadas de igual manera por el ensayo a compresión.

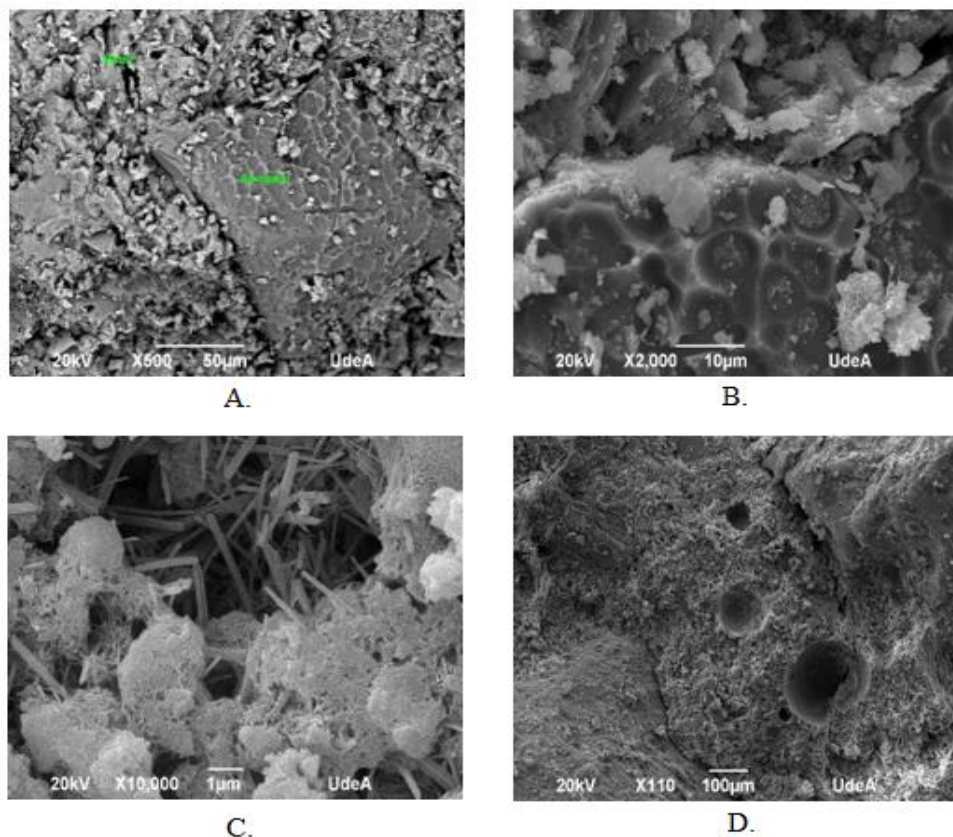


Figura 23. Micrografías SEM concreto sometido a compresión reforzado con $4\text{Kg}/\text{m}^3$ de macro fibra a diferentes aumentos: (A) X500, (B) X2000, (C) X10000, (D) X110.

La Figura 26 corresponde a micrografías SEM de concreto sometido a compresión reforzado con $4\text{Kg}/\text{m}^3$ de macro fibra LDPE-R, es importante tener en cuenta que en el momento de realizar el corte de las muestras para el ensayo SEM, se presentó desprendimiento parcial y total de la pasta cementante con la macro fibra, debido a la fuerza excesiva de la herramienta de corte. La Figura 26 (A) muestra la morfología de la macro fibra y la matriz de una placa de retracción mediante SEM, se puede apreciar que la macro fibra polimérica reciclada no presenta evidencia de daño luego de los 28 días de curado, en la esquina inferior izquierda se puede apreciar el desprendimiento total de una sección de la pasta cementicia. Mientras que en la Figura 26 (B) se observa una superficie rugosa y el anclamiento de cierta cantidad de matriz cementicia sobre la macro fibra polimérica, se corroboró que la macro fibra de polietileno de baja densidad presenta una línea divisoria con la matriz cementante lo cual indica una desfavorable adherencia o el inconveniente anteriormente presentado, como se puede observar en la Figura 26 (C), lo cual disminuye la resistencia tanto a compresión como

flexión. En la Figura 26 (D) se puede apreciar algunas agujas de ettringita y una gran proporción de cristales de portlandita producto de una buena hidratación de la pasta cementicia.

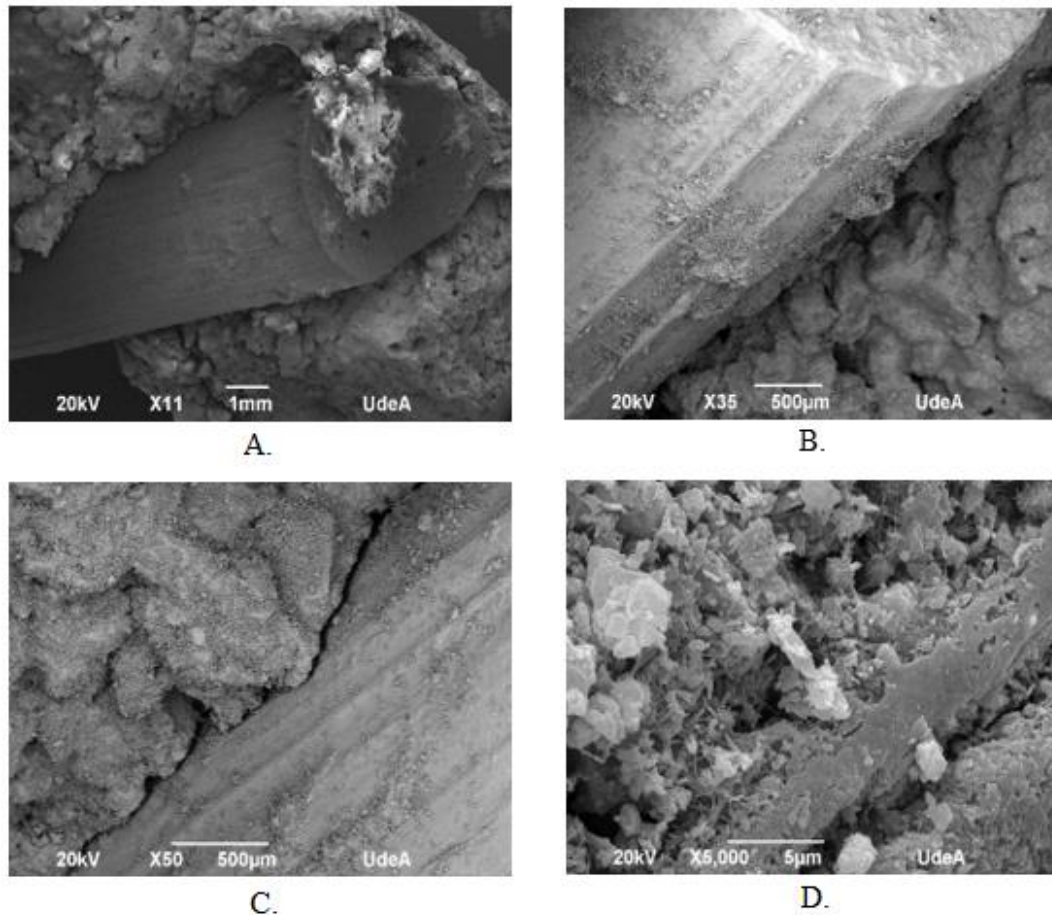


Figura 24. Micrografías SEM compatibilidad de la macro fibra polietileno de baja densidad en el concreto a diferentes aumentos (A) X11, (B) X35, (C) X50, (D) X5000.

6.5. Análisis elemental mediante EDS

La figura 27 (A) muestra una micrografía para un concreto reforzado con macro fibra LDPE-R luego de 28 días de curado sometidas al ensayo de compresión, se observa una buena densificación con una baja cantidad de fisuras tanto en la pasta cementante como en el agregado, En el espectro de la Figura 27 (B) se pueden apreciar picos de carbono, calcio, silicio, oxígeno, hierro y aluminio, componentes principales del cemento.

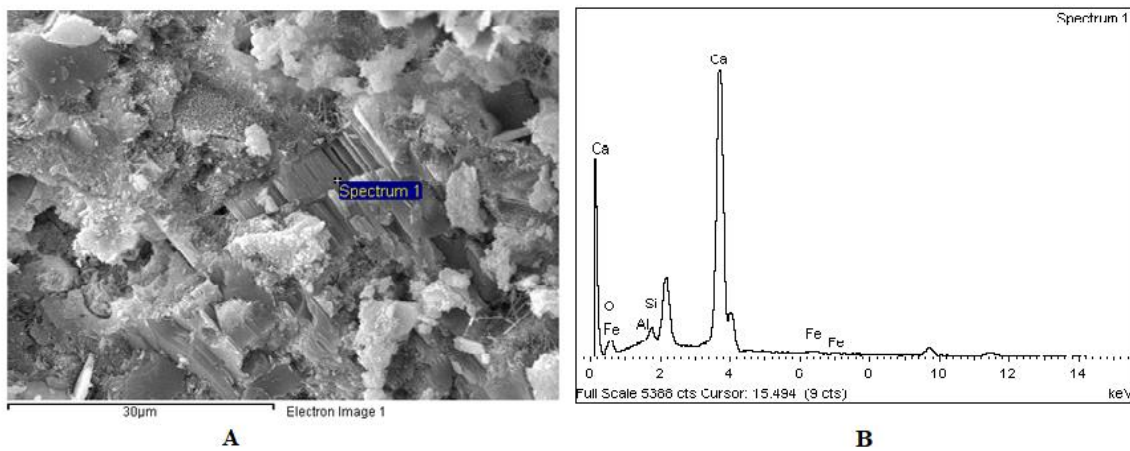


Figura 25. Micrografía SEM de muestra a compresión de concreto con macro fibra luego de 28 días de curado (A), espectro de una de las regiones de la matriz cementante (B).

La figura 28 muestra el mapeo de composición de una macro fibra de polietileno de baja densidad tomada de una placa de retracción luego de 28 días de curado, el espectro de la figura 28 (B) posee los picos característicos de carbono y silicio de un polietileno de baja densidad, que contrarrestado contra un patrón de este polímero rectifica que se trata de un polietileno de baja densidad. Este ensayo fue necesario para corroborar la composición de las macro fibras ya que al tratarse de un material de origen reciclado este podría contar con una composición diferente. Debido a que este es uno de los problemas de los materiales reciclados que no siempre se puede asegurar el tipo de material por la difícil clasificación que conlleva este proceso además de la gran posibilidad de llevar consigo contaminantes. [28].

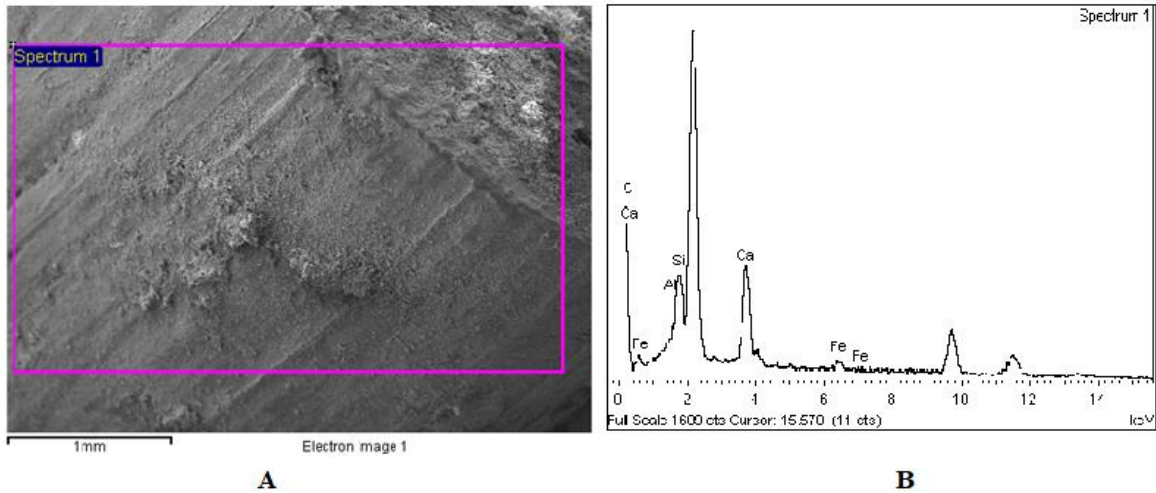


Figura 26. Micrografía SEM de la macro fibra de polietileno de baja densidad proveniente de una placa de retracción luego de 28 días de curado (A), espectro de la región cuadrada (B).

6.6. Viabilidad económica para reemplazo de malla electrosoldada

La malla electrosoldada ha sido el material más utilizado para la fabricación de placas de contrapiso por su economía y buenos resultados. No obstante, los materiales poliméricos han sido de gran acogida por ser materiales económicos, más aún al tratarse de un material polimérico proveniente de reciclaje que baja aún más su valor, lo cual hace que estos materiales se vuelvan atractivos para múltiples aplicaciones.

En el presente trabajo se utilizó una proporción de 4kg/m^3 de macro fibra LDPE-R obteniendo buenos resultados para esta aplicación. En el mercado colombiano se cotiza el kilogramo de este tipo de material en un aproximado máximo de mil pesos colombianos como se puede apreciar en la Tabla 3, lo que significaría que tratar un metro cúbico de concreto con la proporción de macro fibra utilizada en este trabajo tendría un valor de cuatro mil pesos colombianos. Por otra parte, la malla electrosoldada se comercializa en Colombia en medidas estándar de $2,35 \times 6,00$ m, la cual proporciona un rendimiento aproximado de 14 m^2 de concreto y se cotiza aproximadamente en ciento treinta y cinco mil pesos colombianos. En conclusión, tratar la misma área de concreto que llegase a cubrir una malla electrosoldada con macro fibra polimérica reciclada para una placa de contrapiso de $0,7$ m de espesor tendría

un costo de aproximadamente cuarenta mil pesos colombianos, presentando un ahorro del 33%.

Tabla 3. Precios por kilogramo de material polimérico reciclado en Colombia [28].

		Promedio nacional (pesos / Kg)	Número de registros
PET	Cristal sin beneficio y sin compactar	726	7
	Cristal	893	33
	Verde	392	34
	Ámbar	221	14
	Aceite o aseo	346	22
RIGIDO	Natural/blanco	1000	2
	Mezclado todos los colores	680	37
PLASTICO FLEXIBLE / POLICOLOR	blanco post industrial/plástico limpio de alta densidad	862	17
	Limpio de alto color	447	14
	PP transparente	741	11
	Flexible tipo "chirrión"	90	2
	Mezclado	536	7
Desechables (platos, vasos)		77	3

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con base en los resultados obtenidos durante la ejecución de esta investigación se concluye que es posible llegar a sustituir las mallas electrosoldadas por macro fibras poliméricas de polietileno de baja densidad de origen reciclado, a pesar de que las macro fibras obtuvieron menores resistencias que la malla electrosoldada esta cumplió la resistencia de diseño después de los 28 días de edad. Con estos resultados se espera lograr darle importancia al desarrollo de nuevos materiales, que contribuyan al avance de los materiales convencionales implementados en la construcción de manera que minimice el impacto ambiental.
- Las macro fibras de polietileno de baja densidad, con las dimensiones utilizadas en el presente estudio, como material de refuerzo en el concreto disminuyen su resistencia tanto en flexión como en compresión, debido a una baja afinidad del concreto con las macro fibras, esto ocasiona que las macro fibras funcionen como concentradores de esfuerzo y faciliten la falla del material.
- Se obtienen buenos resultados en el comportamiento de retracción de las losas de concreto reforzadas con macro fibras poliméricas reciclada con una proporción de 4 Kg/m³ en comparación con el uso de malla electrosoldada, el uso de macro fibras disminuye la longitud y profundidad de las grietas además del porcentaje de fisuramiento.
- El uso de macro fibras de polietileno de baja densidad recicladas como refuerzo en el concreto como reemplazo a las mallas electrosoldadas para placas de piso en cuanto al carácter económico y ecológico hace de este material un candidato muy atractivo.
- Se recomienda para futuras investigaciones emplear macro fibras poliméricas como por ejemplo polietileno de alta densidad, poli vinil cloruro o nylon de tal manera que posean una mayor densidad a las trabajadas en este proyecto, debido a que una de las

dificultades de esta macro fibra fue que al poseer una densidad menor a la del concreto estas tienden a flotar en la mezcla de concreto en estado fresco. También se recomienda reducir el diámetro de las macro fibras, con el fin de poder elevar la proporción de estas por metro cúbico de concreto, además incrementar la longitud de las macro fibras con el fin de mejorar el anclaje al concreto y de esta manera tratar de aumentar o mantener las propiedades mecánicas del concreto como la resistencia a la flexión

8.REFERENCIAS

- [1] “Colaboracion.Dnp.Gov.Co.” (2021). Retrieved 15 April 2021, From <https://Colaboracion.Dnp.Gov.Co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.Pdf>.
- [2] “Coicué Duarte, L. F., & Sepúlveda Salazar, C. C. (2017). Polietileno De Baja Densidad Como Alternativa Para Mejorar Las Propiedades Mecánicas De Una Mezcla Asfáltica Densa En Caliente MDC-19.”
- [3] "Situación Actual De Los Plásticos En Colombia Y Su Impacto En El Medio Ambiente", Greenpeace.Co, 2019. [Online]. Available: [Http://Greenpeace.Co/Pdf/2019/Gp_Informe_Plasticos_Colombia_02.Pdf](http://Greenpeace.Co/Pdf/2019/Gp_Informe_Plasticos_Colombia_02.Pdf). [Accessed: 30-Nov- 2020].
- [4] "Resolución Número 0277", Mincit.Gov.Co, 2015. [Online]. Available: <https://Www.Mincit.Gov.Co/Temas-Interes/Reglamentos-Tecnicos/Ministerio-De-Comercio-Industria-Y-Turismo/Resolucion-277-Del-2-De-Febrero-De-2015.Aspx>. [Accessed: 30- Nov- 2020].
- [5] "La Degradación Del Plástico Potencia El Efecto Invernadero", Www.Nationalgeographic.Com.Es, 2020. [Online]. Available: https://Www.Nationalgeographic.Com.Es/Ciencia/Actualidad/Degradacion-Plastico-Potencia-Efecto-Invernadero_13126. [Accessed: 30- Nov- 2020].
- [6] “Colaboracion.dnp.gov.co.” (2021). Retrieved 15 April 2021, from <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>.
- [7] Rudolph, N., Kiesel, R., & Aumnate, C. (2017). Understanding Plastics Recycling.

- [8] El (Complejo) Proceso Del Reciclaje Del Plástico | Opemed. Operativa Medioambiental. (2021). Retrieved 15 April 2021, From <Http://Gestionderesiduosonline.Com/El-Complejo-Proceso-Del-Reciclaje-Del-Plastico/>.
- [9] J.Avir, Tipos De Residuos Plásticos Que Sí Se Pueden Aprovechar. (2015). Retrieved 15 April 2021.
- [10] Gaitán Hernández, D. (2021). Diseño De Un Molino Triturador Para Polímeros Termoplásticos Para La Empresa Industria Recuplast S.A.S, (1). Retrieved 15 April 2021.
- [11] Coicué Duarte, L. F., & Sepúlveda Salazar, C. C. (2017). Polietileno De Baja Densidad Como Alternativa Para Mejorar Las Propiedades Mecánicas De Una Mezcla Asfáltica Densa En Caliente MDC-19.
- [12] Polietileno De Baja Densidad. Ub.Edu. (2021). Retrieved 15 April 2021, From <Http://Www.Ub.Edu/Cmematerials/Es/Content/Polietileno-De-Baja-Densidad>.
- [13] Coicue Duarte, L., & Sepulveda Salazar, C. (2017). Polietileno De Baja Densidad Como Alternativa Para Mejorar Las Propiedades Mecánicas De Una Mezcla Asfáltica Densa En Caliente Mdc-19.
- [14] Polietileno (PE). [Tecnologiadelosplasticos.Blogspot.Com](https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com). (2021).[https://tecnologiadelosplasticos.Blogspot.Com/2012/07/Polietileno-Pe.Html](https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/07/polietileno-pe.html).
- [15] Mc Cormac, Jack Y Brown, Russell. Diseño De Concreto Reforzado, Octava Edición Con El Código ACI 318-08, Alfaomega Grupo Editor, S.A. De C.V., México.
- [16] MARSON FRANCO, Bruno Luis. Maccaferri. I Reunión Del Concreto 2010. Aplicación De Micro fibras En Concretos Y Morteros.

- [17] Norma ASTM C 1116 (Especificación Estándar Para Concreto Reforzado Con Fibras).
- [18] Norma ASTM D7508 / D7508M (Para Hebras Cortadas De Poliolefinas, Para Uso En Concreto).
- [19] Macro fibras Sinteticas Para El Concreto. Abacol.Co. (2021). Retrieved 15 April 2021, From Http://Www.Abacol.Co/Assets/Fibraplas-Concrete_Libro_Baja.Pdf.
- [20] ASTM C1399/C1399M – 10 Standard Test Method For Obtaining Average Residual-Strength Of Fiber-Reinforced.
- [21] ACI 224R-01. Control De La Fisuración En Estructuras De Hormigón Informado Por El Comité ACI 224.
- [22] Joisel, Albert. Fisuras Y Grietas En Morteros Y Hormigones, Segunda Edición, Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona, 1972.
- [23] INVIAS, E-222, Gravedad Específica Y Absorción De Agregados Finos. 2007.
- [24] INVIAS, E500-13, Ensayo Granulometría De Agregado Grueso Para. Concreto Hidráulico, 21st ed. 2013.
- [25] ICONTEC, "NTC 92, determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados", 1992.
- [26] ICONTEC, "NTC 396. Ensayo De Asentamiento Del Concreto", 1992.
- [27] J. Bolívar Usme, "Estudio De Concreto Reforzado Con Fibras De Polietileno/Polipropileno En La Empresa Concreto S.A", repositorio UdeA, 2007.

[28] Fabricación De Un Compuesto De Nano-Zno / Polietileno / Fibra De Madera Con Absorción De Microondas Mejorada Y Actividad Fotocatalítica Mediante Un Método Fácil De Prensado En Caliente, 2017.

[29] Encuesta Mensual De Precios Del Mercado De Reciclaje En Colombiásticos. (2020). Recuperado 3 De Marzo De 2021, De https://www.acoplasticos.org/acceso_clientes/imagenes/informe_mensual_precios_abril2020.pdf