

MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÁREA MATERIALES Y PROCESOS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
DEPTO. DE BIBLIOTECA
BIBLIOTECA MINAS

TÍTULO:

**“RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y ADHERENCIA EN
VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO CON BARRAS DE POLÍMEROS
REFORZADOS CON FIBRA FRP”**

PRESENTADO POR:

CLAUDIA JENNY DE LA CRUZ MORALES

ASESORES:

DR. REINALDO RODRÍGUEZ RAMOS

(UNIVERSIDAD DE LA HABANA. CUBA)

I.C., M. Sc. ÁLVARO PÉREZ ARANGO

(UNIVERSIDAD NACIONAL. COLOMBIA)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
SEDE MEDELLÍN

UNAL- Medellín



64000000004668



T
3177
2004

AGRADECIMIENTOS

A Dr. José Darío Aristizabal Ochoa, por su orientación, entusiasmo y constante afán de enseñar y compartir conocimientos con su grupo de investigación.

A Dr. Reinaldo Rodríguez Ramo, por su excelente asesoría y disponibilidad para orientar este trabajo.

A M. Sc. Álvaro Pérez Arango, por su valiosa e importante colaboración, para la culminación de este trabajo.

DEDICATORIA

A Profesor Gabriel Gómez Gil, por su orientación en uno y cada uno de los detalles de este trabajo.

A mi amado esposo Juan Carlos por ser el hombre más inteligente que he conocido, a mis hijos Juan Carlos y Juan Sebastián, quienes siempre me acompañan y facilitan mi trabajo académico e investigativo, y a mi adorado Papá, quien desde el cielo me da su fortaleza.

A Laboratorista Jorge Osorio, quien fue indispensable en la preparación y prueba de las probetas de este trabajo.

A Integrantes del Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, quienes siempre estuvieron dando un fuerte acompañamiento a las tareas investigativas que el trabajo requería.

A Señora Ana Mercedes Valenzuela Gómez, mi amiga, quien siempre me acompañó y ayudó, de manera muy especial en la elaboración de este trabajo.

427 753

AGRADECIMIENTOS

- A Dr. José Darío Aristizabal Ochoa, por su orientación, entusiasmo y constante afán de enseñar y compartir conocimientos con su grupo de investigación.
- A Dr. Reinaldo Rodríguez Ramos, por su excelente asesoría y disponibilidad para orientar este trabajo.
- A M. Sc. Álvaro Pérez Arango, por su valiosa e importante colaboración, para la culminación de este trabajo.
- A Profesor Gabriel Gómez Gil, por su valiosa orientación en uno y cada uno de los detalles de este trabajo.
- A Profesor Jairo Moy, quien siempre estuvo dispuesto a colaborar y orientar en la preparación y prueba de las probetas.
- A Ingeniero Juan Carlos Calle Carmona, quien con su ayuda y excelente capacidad académica me permitió la culminación de este trabajo.
- A Laboratorista Jorge Osorio, quien fue indispensable en la preparación y prueba de las probetas de este trabajo.
- A Integrantes del Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, quienes siempre estuvieron dando un fuerte acompañamiento a las tareas investigativas que el trabajo requería.
- A Señora Ana Mercedes Valenzuela Gómez, mi amiga, quien siempre me acompañó y ayudó, de manera muy especial en la elaboración de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	7
2	INTRODUCCIÓN	8
3	ESTADO DEL ARTE	11
3.1	RESUMEN HISTÓRICO	11
3.2	GENERALIDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	15
3.3	CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	17
3.4	APLICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	21
3.5	MERCADO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	22
4	ESTUDIOS EXPERIMENTALES CON LOS FRP	27
4.1	APLICACIÓN DE LOS POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO CFRP Y FIBRAS DE VIDRIO GFRP	31
4.2	MICROESTRUCTURA DE LA PASTA DE CEMENTO EN EL HORMIGÓN.....	34
4.2.1	FASES EN EL CLÍNKER	37
4.2.1.1	Silicato Tricálcico (C_3S).....	38
4.2.1.2	Silicato Dicálcico (C_2S)	38
4.2.1.3	Fase Ferrita ($C_2F - C_6A_2F$)	38
4.2.1.4	Aluminato tricálcico. (C_3A)	38
4.2.2	FASES MENORES	39
4.2.3	ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL (Norma ASTM C 114).....	40
4.2.3.1	Técnica Petrográfica.....	40
4.2.3.2	Examen microscópico.....	41
4.2.3.3	Absorción de infrarrojos FTIR.....	42
4.2.3.4	Difracción de Rayos X.	42
4.2.3.5	Microscopio Electrónico y Micro-análisis de Rayos X.....	43
4.2.3.6	Análisis Espectrográfico.....	43
4.2.3.7	Análisis Polarográfico.	44
4.2.3.8	Giraldoscopio ó DRC	45
4.2.4	DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE FASES DEL CLÍNKER.....	46
5	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON GFRP, CFRP Y EL ACERO CONVENCIONAL.....	48
5.1	ESTUDIO DE LOS FRP EN MORTEROS Y HORMIGONES.....	53

5.2	CARACTERIZACIÓN MICRO-ESTRUCTURAL DEL MORTERO FRP .	63
6	ADHERENCIA EN EL MORTERO REFORZADO.....	70
6.1	MODELO CONSTITUTIVO PARA MATERIALES COMPUESTOS	70
7	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	84
7.1	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	85
7.1.1	VIGAS CON ARENA DE OTTAWA REFORZADAS CON ACERO CORRUGADO	92
7.1.2	VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON BARRAS DE FRP DE SECCIÓN CIRCULAR	93
7.1.3	VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON BARRAS DE FRP DE SECCIÓN CIRCULAR	93
7.1.4	VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON BARRAS DE FRP DE SECCIÓN CIRCULAR	94
7.1.5	VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON FIBRA POLIMÉRICA PLANA	95
7.2	ENSAYO A FLEXIÓN EN VIGAS RECTANGULARES DE MORTERO REFORZADAS CON ACERO Y BARRAS DE FRP	96
7.3	DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA EN EL MORTERO REFORZADO	97
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	98
8.1	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGAS DE MORTERO SIMPLE	98
8.2	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGAS DE MORTERO REFORZADO	99
8.3	ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LA ADHERENCIA EN EL MORTERO REFORZADO.....	103
8.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y LA ADHERENCIA EN VIGAS DE MORTERO SIMPLE Y REFORZADO.....	110
8.4.1	ANÁLISIS CARGA MÁXIMA EN Kgf.....	110
8.4.2	ANÁLISIS DEL MOMENTO FLECTOR EN Kgf.cm	111
8.4.3	ANÁLISIS DE LA FIGURA 52 (MÓDULO DE ROTURA EN Kgf/cm ²)	112
8.4.4	ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA ADHERENCIA ENTRE EL MORTERO Y EL REFUERZO.	113
8.4.5	ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA ADHERENCIA ENTRE EL MORTERO Y EL REFUERZO.	116
9	ANEXO 1.....	121
9.1	ANÁLISIS DE COSTOS.....	121
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Cronología de aplicación de los materiales compuestos en la última década en la ingeniería civil (5).....	14
Tabla 2	Comparación de algunas propiedades en materiales (6)	15
Tabla 3.	Clasificación de los materiales compuestos	17
Tabla 4	Abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes (20).....	35
Tabla 5	Otros óxidos componentes del cemento (20).....	37
Tabla 6	Compuestos del Cemento Pórtland y sus proporciones aproximadas (20).	37
Tabla 7.	Propiedades en sistemas de Vidrio y Carbono (30)	50
Tabla 8 .	Resistencia y Módulos para barras de refuerzo (30).....	51
Tabla 9.	Resumen de la resistencia a flexión de paneles reforzados (4).	56
Tabla 10.	Dureza Arapree (5).....	59
Tabla 11.	Dureza Durglass (5)	59
Tabla 12.	Ensayo de flexión (Arapree) (5).....	60
Tabla 13.	Ensayo de flexión (Durglass) (5)	60
Tabla 14.	Vigas Patrón Con Arena De Ottawa	98
Tabla 15.	Vigas con arena de ottawa, reforzadas con acero de refuerzo corrugado de diámetro de 4,49 mm	99
Tabla 16.	Vigas con arena normal, reforzadas con acero de refuerzo corrugado de diámetro de 4,49 mm	99
Tabla 17.	Vigas con arena normal, reforzadas con barras de frp de sección circular y diámetro de 9.44 mm	100
Tabla 18.	Vigas con arena normal, reforzadas con frp plano de espesor (e=5,0mm), ancho (b=29,0mm) y longitud (l=260,0 mm)	100
Tabla 19.	Vigas con arena normal, reforzadas con barras de frp, sección circular y diámetro de 21, 86 mm	101
Tabla 20.	Resultados cuantitativos de adherencia entre el mortero y las barras de FRP.....	118
Tabla 21.	Precios de acero corrugado	121
Tabla 22.	Precios FRP	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de materiales compuestos de acuerdo a la geometría de la matriz y el refuerzo (8).	20
Figura 2 Configuración estructural de los compuestos (8).	20
Figura 3. Puntos de vista para la investigación de los compuestos. (8).	21
Figura 4. Estimación de la producción mundial de compuestos de matriz polimérica. (13).	23
Figura 5. Estimación del mercado por regiones en el 2000 de los compuestos de matriz polimérica. (13).	24
Figura 6. Aplicación de los compuestos de matriz polimérica en los Estados Unidos (13).	24
Figura 7. Aplicación de Compuestos de Matriz Polimérica en Europa (13).	25
Figura 8 Propiedades de la resistencia a la tracción en el Vidrio,Carbono y Acero (29).	50
Figura 9. Páneles de espesor óptimo reforzados con barras de FRP (4).	54
Figura 10. Resistencia a la flexión de los páneles (4)	54
Figura 11. Carga vs. Deflexión en paneles con refuerzo FRP circular (4).	55
Figura 12. Carga vs. Deflexión en paneles con refuerzo FRP plano (4)	55
Figura 13. Aumento 10X	57
Figura 14. Aumento 50X	57
Figura 15. Aumento 5X	57
Figura 16. Aumento 20X	57
Figura 17. Aumento 5X	58
Figura 18. Aumento 50X	58
Figura 19. Aumento 5X	58
Figura 20. Aumento 50X	58
Figura 21. Ensayo de Flexión.	60
Figura 22. Ensayo a Cortante.	60
Figura 23. MICROGRAFÍA 1. Pasta de cemento en SEM (37)	63
Figura 24. MICROGRAFÍA 2. Fases en la pasta de cemento (37).	64
Figura 25. MICROGRAFÍA 3. Fases de la aleación. (38)	65
Figura 26. Microanálisis de Rayos X. (37).	66
Figura 27. MICROGRAFÍA 4. Distribución de fibras en el FRP	67
Figura 28. Sección lateral de la probeta (Durglass)	69
Figura 29. Sección transversal de la probeta (Durglass).	69
Figura 30. Sección transversal de la probeta Arapree	69
Figura 34. Presencia de óxido en la superficie del mortero.	82
Figura 35. Implementos para las pruebas y elaboración de especímenes Laboratorio de Estructuras	86

Figura 36. Cálculo de Materiales.....	86
Figura 34. Peso de Materiales.....	86
Figura 35. Mezcla de los Materiales.....	87
Figura 39. Llenado de moldes.....	87
Figura 37. Compactación y colocación de refuerzo.....	87
Figura 38. Ubicación del refuerzo Durglass y Arapréé.....	87
Figura 39. Verificación de la posición del refuerzo.....	88
Figura 40. Probetas con acero y con los nuevos materiales.....	88
Figura 41. Ensayo a flexión NTC 120.....	88
Figura 42. Aplicación de carga.....	88
Figura 43. Falla de la probeta y grieta proyectada.....	89
Figura 44. Aspecto de la probeta fallada y desmontada.....	89
Figura 45. Probetas reforzadas con acero.....	89
Figura 46. Probeta con tinta china en los extremos.....	90
Figura 47. Probeta ubicándose en el dispositivo.....	90
Figura 48. Probetas fijas a las mordazas en la prensa de 3 T.....	90
Figura 49. Probeta en la prensa universal.....	91
Figura 50. Lectura de carga en la escala de 3 T.....	91
Figura 51. Probetas después de la falla.....	91
Figura 52. Falla de probeta con acero corrugado.....	92
Figura 53. Probetas reforzadas con fibra polimérica.....	94
Figura 54. Probetas reforzadas con fibra polimérica disección circular y diámetro de 21.86 mm.....	94
Figura 55. Probetas reforzadas con fibra polimérica de sección plana.....	95
Figura 56. Resumen de los resultados de Módulo de Rotura en vigas rectangulares falladas a flexión.....	102
Figura 57. Falla de la probeta con refuerzo plano.....	103
Figura 58. Falla de probeta reforzada con FRP de diámetro de 21.86 mm.....	103
Figura 59. MICROGRAFÍA 5 Pasta de cemento a un día de falla.....	104
Figura 60. MICROGRAFÍA 6 Pasta de cemento a siete días de falla.....	104
Figura 61. MICROGRAFÍAS 7 y 8 Separación entre el FRP y el mortero.....	105
Figura 62. MICROGRAFÍAS 9 y 10 . Separación FRP y mortero.....	105
Figura 63. MICROGRAFÍA 11. Diámetro de fibras en el FRP.....	106
Figura 64. MICROGRAFIA 12 y 13. Cristales y fisuras en morteros.....	106
Figura 65. Mortero adherido al FRP (Durglass).....	107
Figura 66. Desprendimiento de la fibra.....	107
Figura 67. Fibra adherida a la matriz cementante.....	107
Figura 68. Acero descubierto y corroído.....	108
Figura 69. Superficie del mortero dejada por el refuerzo.....	108
Figura 70. Superficie de FRP cubierta con mortero.....	109

Figura 71. FRP embebido en la matriz de mortero.....	109
Figura 72. Extremo inferior de la probeta en la prensa	119
Figura 73. Comienza registro de carga	119
Figura 74. Extremo refuerzo FRP que deslizó al momento de falla	119
Figura 75. Extremos de mortero deslizados y extremos fijos de hormigón con FRP	119

“RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y ADHERENCIA ENVIGAS DE MORTERO ARMADO CON BARRAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA FRP”

1 RESUMEN

El marco teórico del trabajo de investigación, incluye apartes de las últimas publicaciones relacionadas con el tema del diseño y construcción de hormigones con barras de plástico reforzadas con fibras FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) en la construcción civil, a nivel mundial.

Las propiedades físico-mecánicas de los morteros reforzados con barras de FRP, como son la resistencia a la flexión y la adherencia se evaluaron en modelos de vigas de sección rectangular, sometiéndolas a ensayos a flexión; que una vez falladas, se observaron en el Microscopio Electrónico de Barrido y el Microscopio Estereoscópico para evaluar de manera cualitativa la adherencia; que también se evaluó de manera cuantitativa por técnicas de arrancamiento.

Todos estos ensayos se realizaron con equipos instalados en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Los resultados obtenidos permiten ofrecer una nueva alternativa de reforzamiento de estructuras de hormigón con FRP, que garantice el buen comportamiento (resistencia y adherencia) de éstos nuevos materiales como refuerzo interno y aplicación estructural adecuada y factible, validando los resultados y su aplicación en Colombia.

2 INTRODUCCIÓN

La selección de un material para una aplicación estructural específica depende fundamentalmente de sus propiedades mecánicas. En la construcción civil es necesario definir en el diseño, cuales son las características de resistencia, durabilidad, ductilidad y funcionalidad que la estructura debe cumplir.

Los materiales más utilizados en la construcción colombiana son fundamentalmente el hormigón y el acero de refuerzo, que combinados adecuadamente siguiendo criterios y especificaciones de diseño, permiten proyectar desde prefabricados hasta sistemas estructurales con gran acierto. Pero ocurre que el acero es un metal, al que si nos referimos a su origen electroquímico; se pueden encontrar áreas que se afecten por la permeabilidad del hormigón y la presencia de agua en su estado fresco que facilitan la formación de celdas galvánicas que favorecen la corrosión del mismo.

Otros materiales como las fibras de carbono, fibras de vidrio y aramida, grafito y boro, pueden ser diseñados para resistir las cargas dadas sin alterar la geometría y las dimensiones de la estructura, en contraste con otros materiales convencionales conocidos hasta el momento. La aplicación de otros materiales de refuerzo embebidos en una matriz de hormigón es de uso común en otros países del mundo, cuya combinación genera estructuras hasta tres veces más resistentes, donde los procesos de ejecución se realizan en menos tiempo con menores costos de mano de obra, justificando satisfactoriamente el elevado costo de ellos.

El estudio del material, previo a la selección, se hace necesario para definir las propiedades mecánicas y garantizar el comportamiento adecuado de los materiales constituyentes del elemento estructural.

En el medio de la construcción colombiana se siente un fuerte escepticismo por incluir en la matriz de hormigón un material de refuerzo diferente al acero convencional y paralelamente con los avances tecnológicos se siente la necesidad de conocer las propiedades de los Materiales Compuestos o Materiales del Futuro, como posible solución a diferentes problemas en la Ingeniería.

Los materiales compuestos constituyen un esquema de gran utilidad para el diseñador de estructuras, en aplicaciones aeronáuticas civiles y de alta competición, donde el carbono se combina con la aramida. La aramida confiere resistencia al impacto y el carbono rigidez y resistencias estáticas y a la fatiga. En las aplicaciones estructurales se utilizan cada vez más híbridos vidrio/carbono; donde el carbono se implanta sólo en aquellas áreas críticas y en las direcciones de mayores esfuerzos, consiguiendo elevar los coeficientes de seguridad.

Los Polímeros reforzados con fibras FRP, son materiales que se obtienen por diferentes procesos de fabricación que permite la adaptación de dicho material compuesto a las formas y dimensiones deseadas, con la ayuda de un molde (1).

El estudio y evaluación de algunos materiales compuestos de última tecnología en el país, como lo son los Plásticos Reforzados con fibras de Vidrio GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) y Plásticos Reforzados con fibras de carbono CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, tienen como referencia varios trabajos dirigidos de grado; “Repotenciación de vigas de hormigón mediante el uso de mantos de fibra de carbono” (2) y “Reforzamiento a cortante de vigas de hormigón reforzado con cintas de fibras de carbono” (3) (asesorados por el Ingeniero Álvaro Pérez Arango); “ Morteros Emulsificados y algunas aplicaciones” (4) y “ Estudio de algunos materiales plásticos reforzados con fibras de vidrio y aramida y sus aplicaciones en la ingeniería” (5) (asesorados por la Ingeniera Claudia Jenny De la Cruz Morales).

Los trabajos mencionados sólo se constituyen en un inicio de lo que será una investigación con exigencias fuertes de análisis, diseño y experimentación; debido a que en Colombia, la técnica de reforzamiento de estructuras que se utiliza está basada en el uso del acero convencional, lo que limita las posibilidades de industrialización de productos de plásticos reforzados con fibra y por tanto su uso como material de refuerzo.

Las especificaciones para el diseño de hormigón armado con FRP, ya existen y se aplican específicamente en Europa y Estados Unidos. La tendencia en Colombia para el uso de los FRP, ha sido en la reparación, rehabilitación y reforzamiento externo de algunas estructuras como en la ciudad de Armenia y Santafé de Bogotá entre otras; situación que debe orientarse a la incorporación de técnicas de fabricación y aplicación de los FRP en la construcción civil

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 RESUMEN HISTÓRICO

Los primeros usos de materiales compuestos ingenieriles, Polímeros Reforzados con Fibra FRP, hechos por el hombre tienen sus inicios en el año 1800 A.C, cuando se usaban ladrillos de barro reforzados con paja para la construcción de edificaciones.

A continuación se presenta una cronología de los FRP (5):

- 1832 Se describe por primera vez un proceso de estirado continuo de finos elementos de vidrio.

- 1862 Alexander Parkes, presentó en Londres un material “tan duro como el marfil y sin embargo capaz de esparcirse en una forma similar al caucho de la India”. Era un compuesto de acetato de celulosa plastificado con alcanfor, este material “Parkesine” es reconocido como el primer polímero sintético hecho por el hombre.

- 1907 Backeland saca una patente de un producto denominado Baquelita, obtenido por la condensación de fenol y formaldehído, el predecesor de las resinas fenólicas basadas en resoles y ahora ampliamente empleados en algunos sectores industriales.

- 1920 El químico alemán Herman Staudinger mientras trabajaba en Suiza sacó adelante su teoría sobre las macro moléculas o polímeros, por lo cual recibió el Premio Nóbel en 1953.

- 1931 La fibra de vidrio utilizada en filtros de aire llega a ser comercialmente disponible.
- 1934 Carelton Ellis patentó las resinas de poliéster insaturado.
- 1942 Nació accidentalmente la industria del plástico reforzado, cuando una cantidad de resina de poliéster termoestable catalizada se derramó sobre unas capas de telas de fibra de vidrio y permanecieron en contacto durante toda la noche.
- 1945 W. Brandt Goldsworthy de Industrial Plastic Co. construyó el primer cuerpo de automóvil en plástico reforzado.
- 1946 Se hizo una demostración inicial de las resinas epoxi.
- 1952 Primera producción en masa de un producto de FRP, comienza la producción en la empresa Molded Fiber Glass Tray Co. De 40.000 bandejas de distribución de pan para la empresa Wonder Bread.
- 1953 Primera producción en masa de cuerpos de autos en FRP, el Chevrolet Corvette se proclama como el carro deportivo del futuro en Norteamérica, la GMC1 establece una línea de ensamble en Michigan.
- 1963 Studebaker Avanti desarrolló el primer cuerpo total en FRP de un auto descapotable.
- 1966 Las primeras fibras de carbono de alto módulo son comercialmente disponibles.
-

- 1968 Construcción de la estructura del Domo en Benghazi, primera aplicación de los materiales compuestos en la Ingeniería civil.
- 1970 Comienza a surgir en la Ingeniería como solución en la construcción el reforzamiento de estructuras con barras de FRP.
- 1971 Es terminado en Londres el Mundial House, un prestigioso edificio revestido con paneles de FRP.
- 1977 Certain Teed abre una fábrica de fibra de vidrio de 60.000m² en Wichita Falls.
- 1980 BP Chemicals Ltd, comercializó el primer grupo de sistemas Fenólicos (resoles) que poseen buen comportamiento al fuego con baja emisión de humos y baja toxicidad.
- 1981 El mercado en Europa y los Estados Unidos demandan el uso del reforzamiento no metálico para especificaciones tecnológicas avanzadas.
- 1983 Plecnik and Ahmad, con el primer proyecto fundador USDOT en los Estados Unidos. Owens-Corning Fiberglass identificó más de 50000 aplicaciones individuales de los plásticos reforzados.
- 1985 El Instituto de Composites de la Sociedad de Industriales del Plástico, en New York, celebró su conferencia número Cuarenta.
- 1986 Reforzamiento en Alemania del primer puente pretensado con barras de FRP.

1987 Se incrementó el uso de “Composites” reforzados con fibras de carbono en la industria aeroespacial en elementos estructurales internos y en superficies de control.

En Tabla 1 se recopila la utilización de los materiales compuestos en la Ingeniería Civil durante la última década.

Tabla 1 Cronología de aplicación de los materiales compuestos en la última década en la ingeniería civil (5)

Año	Proyecto	Material	Lugar
1990	Pilas en ingeniería hidráulica	Arapree	Alphen Maas, NL
1991	Puente. 54m de luz	Arapree	Mito, Japón.
1992	Rehabilitación de mampostería sujeta a carga cíclica	Arapree	Torino, Italia
1993	Consolidación de una estructura del siglo XVIII	Arapree	Torino, Italia
1995	Metro de Roma, (estación Baldo degli ubaldi)	Durglass	Roma, Italia
1995	Recubrimiento de una vía subterránea deteriorada	Arapree	Roma, Italia
1995	Vía subterránea	Durglass	Toulon, Francia
1995	Puente Peatonal Fidgett	Arapree	Inglaterra
1996	Trabajos de consolidación	Arapree	Torino, Italia
1996	Túnel para vía férrea	Durglass	Florenca, Italia
1996	Restauración de convento	Arapree	Nápoles, Italia
1996	Construcción de puente en West Virginia	Durglass	W.V USA
1997	Túnel de Villavicencio	Durglass	Colombia
1997	Construcción de túnel en el mediterráneo. TGV.	Durglass	Francia
1997	Línea de Metro	Durglass	Lisboa. Portugal
1997	Construcción de losa pretensada aligerada	Arapree	Novara, Italia
1997	Puente “Crowchild”	Durglass	Alberta, Canadá
1997	Puente Sherbrooke	Carbopree y Arapree	Canadá
1998	Anclajes a tierra en el metro de Rennes	Durglass	Francia
1998	Puente Kewnt County Road No.10	Carbopree	Canadá
1998	Restauración de la catedral de Naro	Arapree	Sicilia, Italia
1999	Túnel para vía férrea	Durglass	Iselle, Italia
1999	Avenida Ohio´s Salem	Durglass	USA
1999	Pierce Street Brigde (Losas)	FRP	USA
2000	Metro de Sunderland	Carbopree	Inglaterra
2001	Construcción de túnel	Durglass	Bologna, Italia

3.2 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Se tienen en cuenta algunas razones importantes para fijar el interés en los materiales compuestos, entre ellas están:

1. El desarrollo de filamentos continuos de alta resistencia y alto módulo de elasticidad como el boro y el grafito (Ver Tabla 2).
2. El desarrollo de matrices de materiales con rigidez y resistencia aumentada y resistencia a la temperatura.
3. La gran demanda en las diferentes industrias de materiales compuestos que tienen propiedades que pueden ajustarse a las necesidades de diseño.
4. A pesar de que los materiales compuestos FRP, en barras de GFRP y CFRP, presentan un comportamiento frágil; combinados con el material compuesto hormigón; ofrecen un compuesto para altas prestaciones con un comportamiento dúctil.

En Tabla 2, están los datos de Resistencia en MPa, Módulo de Elasticidad en MPa y Densidad en Mg/m³, de materiales tales como el Vidrio, Grafito, Boro, Hormigón y Acero, de uso común en la construcción civil.

Tabla 2 Comparación de algunas propiedades en materiales (6)

	RESISTENCIA [MPa]	MÓDULO DE ELASTICIDAD [MPa]	DENSIDAD [Mg/m³]
VIDRIO	3.103 x 10 ³	7.584 x 10 ⁴	2.491
GRAFITO	2.068 – 2.758 x 10 ³	2.413 – 3.447 x 10 ⁵	1.467 – 1.799
BORO	2.758 x 10 ³	4.137 x 10 ⁵	2.63
HORMIGÓN	0.02069 x 10 ³	2.0 x 10 ⁴	2.4
ACERO	0.551 x 10 ³	2.0 x 10 ⁵	7.8

Los métodos de modelación matemática para la homogeneización de compuestos formados por materiales con diferentes propiedades son importantes, y se encuentran en estudio por grupos de investigación a nivel mundial que basan la

mayoría de sus teorías en la ecuación generalizada de Hooke; aplicada con gran aproximación, comparada con teorías tradicionales de homogeneización (6).

Un Material Compuesto consiste de un ensamble de materiales de diferente naturaleza que permite obtener un nuevo material en el cual las propiedades en conjunto deben ser mucho mejores que las de las componentes separadamente; tal es el caso de los laminados, cuyas estructuras están constituidas en materiales compuestos y la lámina constituye la unidad básica del laminado (7).

El estudio de la Teoría de Laminados en los Materiales Compuestos exige una evaluación extensa del aporte individual que hace cada uno de los materiales constituyentes en el compuesto. En láminas tipo tejido, todas las fibras están orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí; y la urdimbre (fibras longitudinales) está entrelazada en la trama (fibras trasversales).

El 50% de la fibra puede estar orientada en cada dirección (tejido equilibrado) o puede haber más fibras en una dirección que en la otra (tejido no equilibrado). Se considera que existe ortotropía en este tipo de materiales.

Las propiedades del material compuesto resultan de:

- Las propiedades de los materiales constituyentes
- Sus distribuciones geométricas
- Sus interacciones
- Compatibilidad de deformaciones, etc.

Para describir un material compuesto es necesario especificar:

- La naturaleza de los constituyentes y sus propiedades
- La geometría del refuerzo y su distribución
- La naturaleza de la interfase matriz-refuerzo.

3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

La clasificación más conocida y resumida de los Materiales compuestos en sentido general, aparece en la siguiente Tabla 3

Tabla 3. Clasificación de los materiales compuestos

	CONSTITUYENTES	ÁREAS DE APLICACIÓN
1. COMPUESTO CON MATRIZ ORGÁNICA: Papel, tarjetas Paneles de particulado Paneles de fibra Lonas recubiertas Materiales Impermeables Ruedas Láminas Plásticos reforzados	Resina/rellenos/fibras Celusosa Resina/virutas de madera Resina/fibras de madera Resinas flexibles/ropa Elastómeros/betún/textiles Caucho/lonas/acero Resina/rellenos/fibras de vidrio/fibras de carbón, etc.	Impresiones, empaquetamiento Trabajo de madera Construcciones Deportes/construcciones Techos, terraplenes Automóviles Múltiples áreas
2. COMPUESTOS CON MATRIZ MINERAL: Hormigón Compuestos de carbón-carbón Compuestos cerámico	Cemento/arena/gravilla Carbón/fibras de carbón Cerámico/fibras cerámico	Ingeniería civil Aviación, deportes, biomedicina Objetos termomecánicos
3. COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA	Aluminio/fibras de boro Aluminio/fibras de carbón	Espacial
SANDWICHES Capas Núcleos	Metales, laminas, etc. Espuma, panales, plásticos reforzados, etc.	Múltiples áreas.

La geometría del refuerzo puede ser caracterizada por su forma, tamaño y concentración del refuerzo, su disposición (su orientación), etc. Si el conjunto de estos parámetros se combinan para determinar las propiedades del compuesto, los modelos descriptivos tendrán sentido para ciertos parámetros debido a la complejidad de los fenómenos que los envuelven.

La concentración del refuerzo es usualmente medida por el volumen de fracción o por el peso de fracción. Para una concentración dada, la distribución del refuerzo en el volumen del compuesto, es también un parámetro importante (5).

Una distribución uniforme asegurará una “homogeneidad” del material, es decir, las propiedades del compuesto serán independientes de la posición de medición. En el caso de una distribución no uniforme del refuerzo, la fractura del material será iniciada en las zonas pobres en refuerzos, por lo que disminuirá la resistencia del compuesto.

En el caso de materiales compuestos en el cual el refuerzo está formado por fibras, la orientación de las fibras determina la anisotropía del material compuesto. Este aspecto es una de las características fundamentales de los compuestos, y tener la posibilidad de controlar la anisotropía de un producto para un diseño y fabricación adaptado a las propiedades deseadas, resulta de gran importancia, debido a la versatilidad en el diseño y manufactura que ofrece la industria en la fabricación de los mismos.

Las fibras en los compuestos se pueden presentar en forma continua o como fibra cortada. Los llamados whiskers o pelos se utilizan en los materiales compuestos como elementos de refuerzo. Existen otros tipos de fibras especiales que se utilizan en los materiales compuestos como son las fibras ópticas, las cuales se utilizan para aplicaciones donde es necesario un control del daño o del propio curado.

Para lograr un buen diseño con materiales compuestos es fundamental emplear los constituyentes apropiados y colocarlos de la forma más ideal de acuerdo a la geometría de la matriz y el refuerzo; para obtener un comportamiento óptimo con la combinación adecuada de cuatro factores críticos como son la forma, el refuerzo, la resina y el proceso, considerando fundamentalmente lo siguiente en cada uno de estos factores:

1. **Forma:** Tamaño de la pieza para soportar las cargas, sección transversal.
2. **Refuerzo:** Debe ser elegido de tal forma que proporcione el mínimo espesor y la máxima resistencia, tan alejados del eje neutro como sea

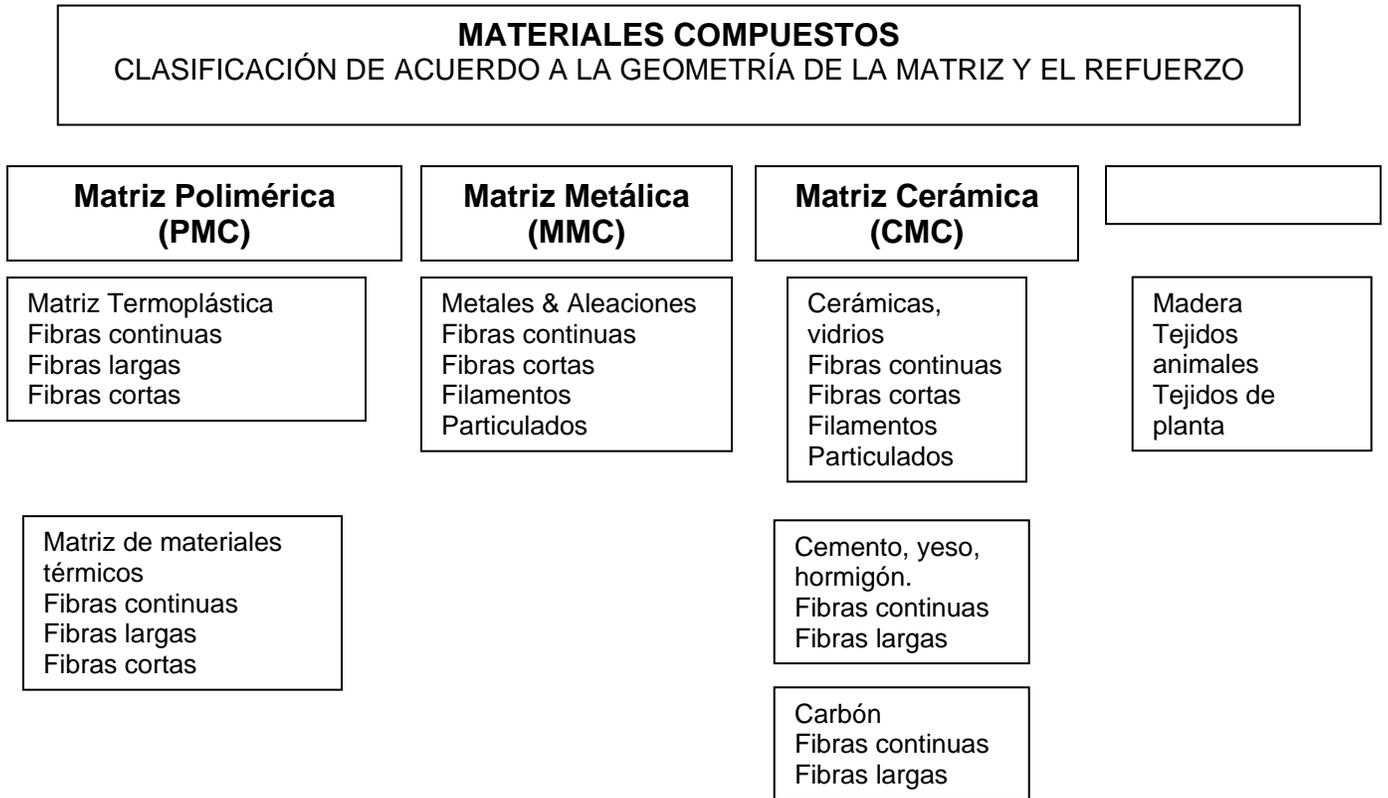
posible para aumentar su inercia y rigidez (diseño a flexión), esto puede lograrse utilizando la cantidad de fibra adecuada.

3. **Resina:** Puede tener requerimientos especiales, como resistencia al fuego, resistencia química y/o resistencia a los U.V. Las cualidades de la resina están determinadas por el uso.
4. **Proceso:** El proceso depende de la configuración de la pieza y las cantidades necesarias.

En conclusión para la mayoría de las aplicaciones ingenieriles, los compuestos se pueden clasificar en diversos tipos de acuerdo a la geometría de la matriz y el refuerzo, ver Figura 1.

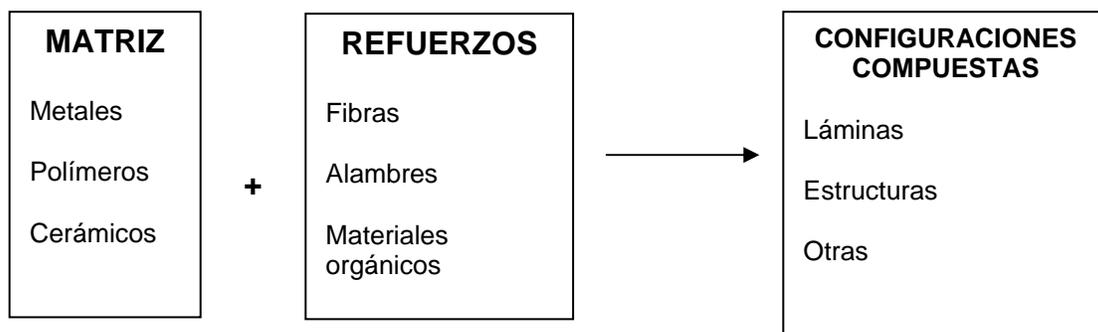
- **Fibrosos:** Compuesto de fibras continuas o porciones de fibras.
- **Particulado:** Compuesto formado por partículas.
- **Laminado:** Compuesto de capas o láminas constituyentes.
- **Hojuelas:** Compuesto de hojuelas planas.
- **Relleno/Esqueleto:** Matriz continua esquelética rellena por un segundo material.
- **Cilíndricos:** Compuestos de fibras cilíndricas

Figura 1. Clasificación de materiales compuestos de acuerdo a la geometría de la matriz y el refuerzo (8).



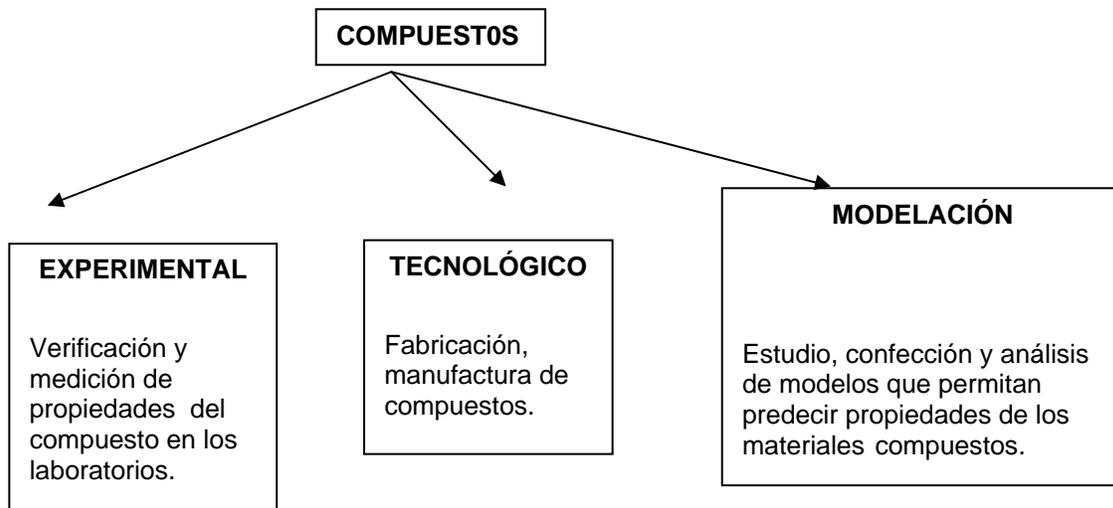
La configuración estructural de los compuestos puede ser descrita a través de la Figura 2:

Figura 2 Configuración estructural de los compuestos (8).



El estudio de los materiales compuestos posee diferentes puntos de vista para su investigación, los cuales para una mejor explicación se pueden representar como aparece en la Figura 3:

Figura 3. Puntos de vista para la investigación de los compuestos. (8).



3.4 APLICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

En la actualidad existen múltiples aplicaciones prácticas de los materiales compuestos, por ejemplo, ellos se utilizan en la industria aeroespacial en la construcción de aviones, hélices, helicópteros, satélites, naves espaciales, etc., en la industria mecánica en la construcción de automóviles, turbinas, barcos, equipos pesados y ligeros, en la industria de la construcción: construcciones civiles, puentes, estructuras, etc., en la medicina: equipos médicos, prótesis, etc.

Son varios los autores de artículos en revistas internacionales como Salem Faza, Antonio Nanni , (9), Nabil (10) y Guy M. Connelly (11), dedicados al estudio del comportamiento de los materiales compuestos como refuerzo en la matriz de hormigón.

En la gran mayoría de los artículos se examina la resistencia a la flexión, la resistencia a la compresión y el estado de los materiales de refuerzo, de elementos estructurales de construcciones reparadas o rehabilitadas con materiales compuestos, especialmente como recubrimiento externo.

La adherencia sigue jugando un papel fundamental en el diseño y construcción con barras de FRP, y por tanto el ancho de fisura se puede calcular utilizando los conceptos del ACI 318-03, para barras de FRP con comportamiento similar al del acero según Gao, Benmokrame y Tighiouart. (12).

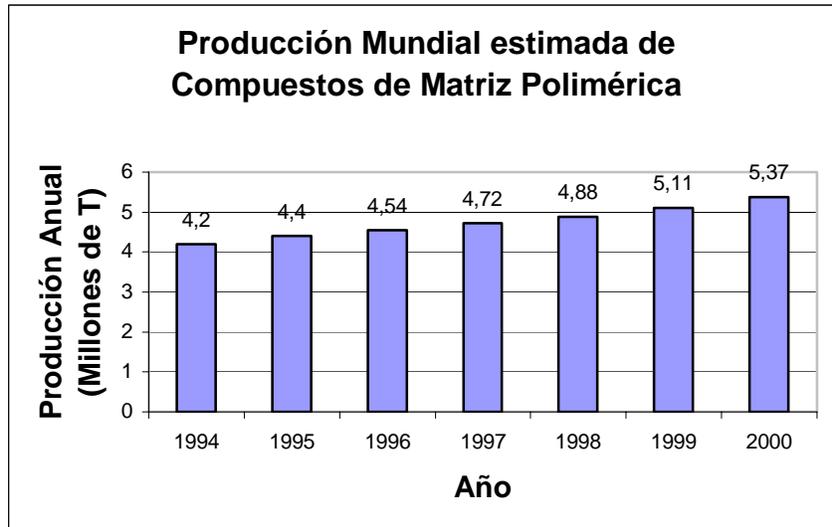
3.5 MERCADO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

El mercado mundial total para los compuestos ha sido estimado de manera conservativa en 25 billones de dólares según (Owens Corning Annual Report, 1998). Este mercado está dominado por los refuerzos de vidrios en poliéster insaturados y resinas termoplásticas, las cuales juntas comprenden el 90% del total (13).

En la Figura 4, está la producción estimada total de todos los compuestos de matriz polimérica, incluyendo los compuestos avanzados.

La tasa de crecimiento anual es de aproximadamente de un 5% sobre el período completo. Las fuentes de estos datos son Society for the Plastics Industry (SPI) Composites Institute, Half-yearly Market Statistics 1994-1998. (13).

Figura 4. Estimación de la producción mundial de compuestos de matriz polimérica. (13).



En la Figura 5, está la división del mercado entre las principales regiones productoras. La Comunidad Económica Europea y los Estados Unidos abarcan cada uno un tercio del total. Los datos fueron registrados y extrapolados de diferentes fuentes (13).

En la Figura 6, se observa en porcentaje las diversas aplicaciones de los compuestos de matriz polimérica en los Estados Unidos. La información actualizada del mercado mundial de los compuestos puede ser consultada en revistas y artículos de Reinforced Plastics; como también en páginas de internet de Empresas dedicadas a la manufactura y construcción con FRP.

Figura 5. Estimación del mercado por regiones en el 2000 de los compuestos de matriz polimérica. (13).

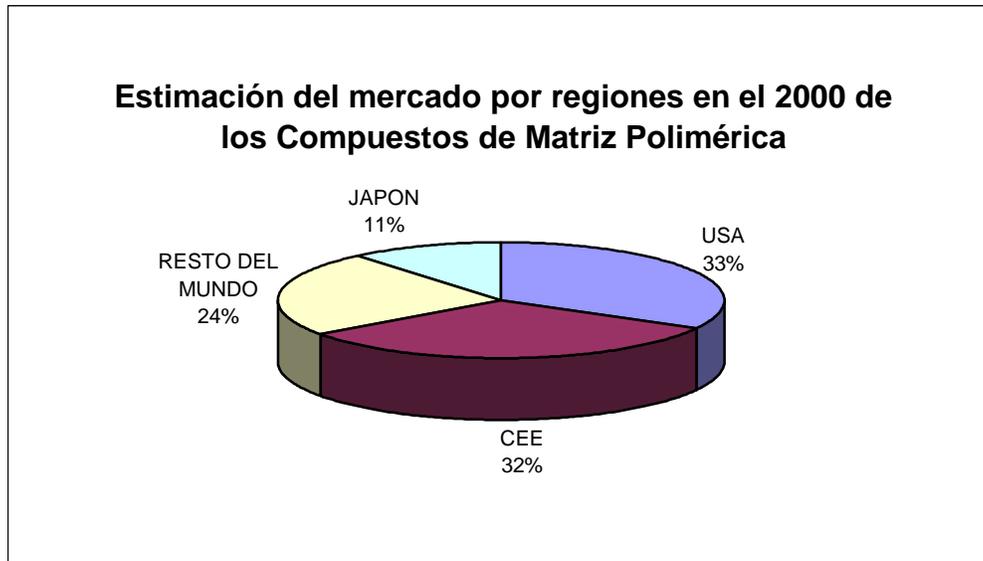
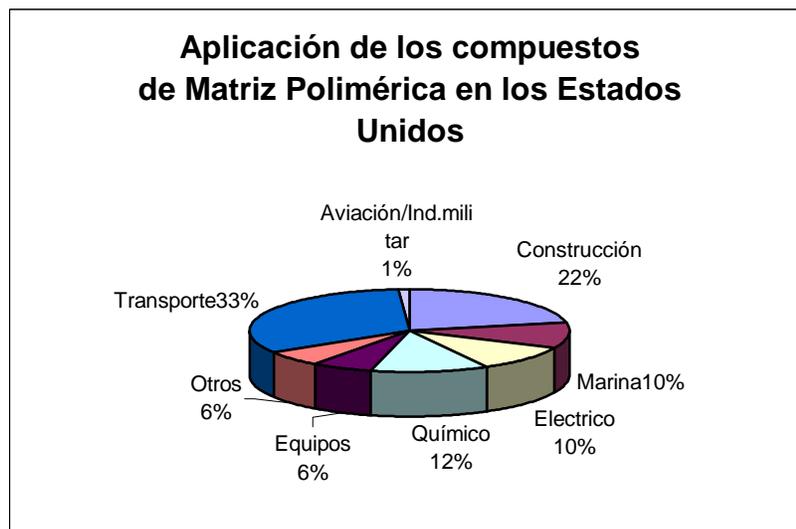


Figura 6. Aplicación de los compuestos de matriz polimérica en los Estados Unidos (13).

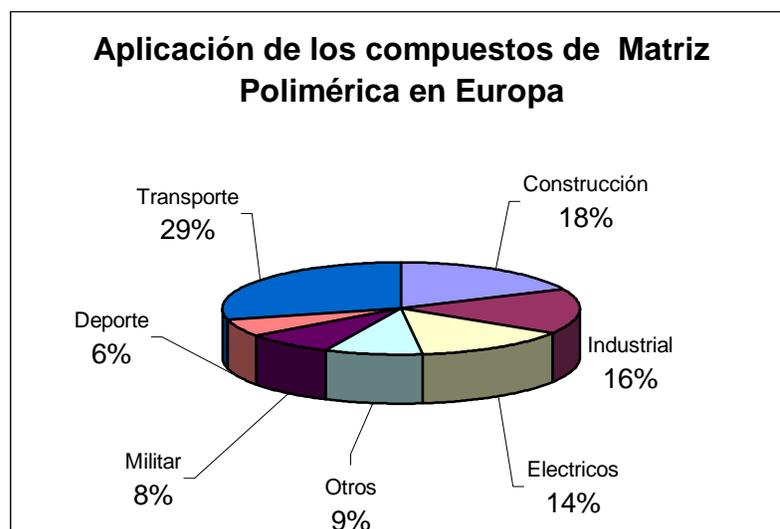


En Europa, el uso de los Polímeros Reforzados con Fibras FRP, para la reparación y rehabilitación de estructuras data desde el año 1975

aproximadamente; y en los Estados Unidos las primeras aplicaciones se presentaron desde el año 1996 (1); pues hasta este año las especificaciones no existían, pero varios investigadores (entre ellos B. Benmokrane, O. Chaallal y R. Masmoudi), se han dedicado a establecer mediante el trabajo experimental, una normativa universal para el análisis y diseño de estructuras reforzadas con FRP (14).

La aplicación de los compuestos de matriz polimérica en Europa, está en la Figura 7, representado en porcentajes.

Figura 7. Aplicación de Compuestos de Matriz Polimérica en Europa (13).



Las aplicaciones de los compuestos de fibras de carbono en la Aeronáutica, deportes y la industria ha estado creciendo, sin embargo se prevee que un futuro crecimiento sea mayor en las aplicaciones industriales, especialmente en los Estados Unidos. Esta nueva y eficiente alternativa, se ha convertido desde su descubrimiento en una técnica ágil, fácil y versátil para la rehabilitación, reparación y reforzamiento de estructuras de hormigón a nivel mundial.

Tanto en Europa como en los Estados Unidos la investigación y utilización de los nuevos materiales han permitido realizar una recopilación bibliográfica de

experiencias en universidades y experiencias reales de construcción con FRP pretensado (Tokio, Reino Unido, Québec), para chequear el comportamiento de estos materiales FRP pretensados en estructuras de hormigón. En la industria la construcción Colombiana, el material más utilizado es el hormigón reforzado con acero convencional; de ahí que los proyectistas de estructuras de hormigón armado, adopten el método de diseño con factores de carga y resistencia. Este método incluye procedimientos de diseño asociados con el diseño último, con el diseño plástico y con el diseño al límite o diseño al colapso.

4 ESTUDIOS EXPERIMENTALES CON LOS FRP

En las investigaciones de los FRP, se ha comprobado que estos materiales de polímeros reforzados con fibra tienen limitaciones de carga sostenida, que afecta considerablemente la determinación de usar FRP; pero embebidos en la matriz de hormigón, permiten un comportamiento dúctil del conjunto, garantizando debido a que lo que se espera en caso de un sismo o algún imprevisto, que la estructura presente un comportamiento dúctil, y se sabe que con este tipo de material la falla que se espera, de no hacer las consideraciones anteriormente mencionadas, es frágil (para el diseño con FRP se hace el análisis y estudio a las barras y para repotenciar estructuras se estudia el comportamiento de platinas y franjas de FRP).

Con diferentes estudios experimentales realizados en estructuras de hormigón pretensadas con los materiales FRP, se llegó a la conclusión, que el diseño con FRP debe considerar la demanda de deformación en la estructura, para asegurar que esta sea menor que la capacidad de deformación del torón; pues lo que se pretende es que los torones trabajen y no permitir que la falla frágil de los FRP ocurra primero que el aplastamiento del hormigón (1).

Para el pretensionamiento de estructuras con FRP, las investigaciones y experimentaciones, han permitido tener una idea clara de la aplicación y comportamiento de los polímeros reforzados con fibra (vidrio, carbono, aramida) para las estructuras de hormigón en la construcción civil en Europa y los Estados Unidos.

El pretensado con CFRP, es una técnica innovadora para la construcción de puentes. La relación de la energía absorbida y la total, es un indicador apropiado de la ductilidad de los sistemas de puentes de hormigón pretensados con CFRP

(esta definición básica puede ser utilizada en estructuras con materiales convencionales).

Los altos costos de estos materiales se ven altamente compensados con las facilidades de manejo, colocación y durabilidad que ofrecen. Los FRP con carbono (CFRP), aportan enormemente a la resistencia de la estructura pero sus costos son más elevados y los resultados son mejores que los obtenidos en proyectos con otros FRP reforzados con otro tipo de fibra; ofreciendo además, una vida de servicio de hasta 75 años; que de acuerdo a las necesidades de la construcción, se pueden diseñar para satisfacer los requerimientos de longitud, sección y resistencia (14).

El buen desempeño de los FRP ha facilitado el aprovechamiento de las propiedades y ventajas de los polímeros reforzados con fibras de carbono CFRP, como es su resistencia a la corrosión, respuesta a la fatiga, elevada resiliencia, bajo peso y alta dureza, sin olvidar la baja ductilidad, que ha sido la mayor preocupación en numerosas investigaciones para el pretensado de puentes en la construcción civil.

Para garantizar la respuesta estructural investigadores del diseño de estructuras de hormigón armadas con FRP (Nabil F. Grace y George (10,15))., realizaron un trabajo orientado a la elaboración de modelos de vigas en puentes construidos para chequear el comportamiento real de las vigas en la estructura. Este trabajo experimental consistió en la fabricación de cuatro (4) vigas de hormigón pretensadas variando la posición de los torones y sin utilización de lechada al interior de la tubería (los torones internos no fueron adheridos para examinar los efectos por la no adherencia del puente, sin embargo la no adherencia interna originó una fisura en la zona de momento máximo), situación que los autores tenían prevista, pues en anteriores pruebas utilizando el “grouting” en las tuberías se obtenía un número alto de fisuras a lo largo de la luz.

Con base en la premisa de que la sustitución del acero de refuerzo por CFRP trae como consecuencia grandes deformaciones elásticas y pérdida de ductilidad se hace necesario realizar una investigación exhaustiva del uso de CFRP para la construcción de puentes pretensados, pues los resultados obtenidos al fallar las vigas en la experimentación, arrojó resultados distintos de comportamiento esperado; todos con muestras de baja ductilidad. La anterior situación no debe descartar el diseño de puentes pretensados con CFRP, pero no se deben incrementar las deflexiones a carga última para mejorar el incremento de ductilidad, ya que esta situación sería una interpretación errónea de ductilidad estructural a flexión; ya que el bajo Módulo de Elasticidad de las barras de FRP en la Matriz de Hormigón favorece la ductilidad de todo el compuesto.

Para el diseño de los elementos de hormigón con CFRP y otros FRP es necesario y muy importante que al momento de hacer los cálculos, si se consideran las propiedades de la fibra, sea así durante todo el diseño; y si se realiza considerando el comportamiento de las barras sea también así durante todo el diseño; debido a la diferencia del comportamiento de las fibras, barras y mantos de FRP, que interactúan con el hormigón.

En Colombia ya se han aplicado estos materiales para la reparación de estructuras que han sufrido grandes daños ante la presencia de sismos fuertes, como en el caso específico del terremoto en la ciudad de Armenia en el año de 1999, las rehabilitaciones de los Templos San Francisco en la misma ciudad y el Templo de Jesús, María y José, en Quimbaya (16); como también en estructuras en la ciudad de Barranquilla que se han deteriorado por el ataque de cloruros y agentes atmosféricos; con respuestas muy buenas en cuanto al comportamiento de las estructuras reparadas y rehabilitadas ante las diferentes sollicitaciones que se encuentran expuestas y con bajos costos de mantenimiento y mano de obra en las diferentes aplicaciones.

Las recomendaciones de aplicación y distribución de mantos de CFRP y GFRP, se seguían según las normativas Suizas, pero desde Enero de 2003, se han dado a conocer las guías de diseño e instalación de Platinas Sika CarboDur, Tejidos SikaWrap, Platinas en forma de L Sika CarboShear Platinas Preesforzadas Sika Leoba CarboDur y Sika StressHead , con ejemplos de diseño con base a las especificaciones del ACI 440-2002 (Estandar Norteamericano); Boletín 14 del FIB (Federation Internationale du Beton)/2001 (Basado en el Eurocódigo) y Reporte Técnico No. 55 de la Sociedad del Concreto del Reino Unido/2000 (17). Estas especificaciones tienen como objeto facilitar al diseñador el estudio de los ejemplos, aplicación de los mismos y explicar el uso de los diferentes sistemas de reforzamiento con los FRP.

El desarrollo de esta nueva alternativa de reparación, rehabilitación y reforzamiento de estructuras de hormigón, ha exigido la realización de trabajos experimentales para proponer nuevas formulaciones y criterios de diseño acorde con las propiedades físicas y mecánicas de los FRP como material de refuerzo interno en estructuras de hormigón armado, con el comportamiento a compresión, y con la variación de capacidad de resistencia y deformación en los miembros de sección circular, cuadrada y cuadrada con bordes redondeados reforzados con FRP.

Los resultados de Nabil F. Grace. (18), donde se prepararon prototipos de vigas rectangulares falladas a flexión, se obtuvieron correlaciones hasta del 92%, lo que es bastante bueno comparado con otras pruebas, que se han efectuado; lo que permite concluir que el uso de los FRP embebidos en la matriz de hormigón ofrece un compuesto con mayores incrementos de resistencia y ductilidad, además de grandes ventajas respecto a estructuras de hormigón reforzadas con acero convencional; y en el caso particular a la deformación de miembros reforzados con GFRP, se ha detectado una ductilidad análoga a la que presentan vigas de hormigón reforzadas con acero convencional.

La presencia del FRP en el hormigón, origina un cambio significativo en términos de máxima resistencia y deformación, especialmente el aumento de resistencia comparado con hormigones reforzados con acero convencional de sección circular. Menos efectivo se observó el confinamiento para secciones cuadradas y cuadradas de bordes redondeados; comparado con métodos de análisis que se siguen para el diseño de elementos estructurales de hormigón reforzados con acero (18).

Queda demostrado una vez más el aporte definitivo y necesario que hace la resistencia de materiales, y el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales por separado que formarán el compuesto; mediante la aplicación de ecuaciones, conocimiento previo de las propiedades de los materiales, resistencia última y deformación de miembros de hormigón reforzados con FRP (19); además la forma de la sección transversal afecta los resultados de resistencia en elementos de hormigón a compresión, se da una reducción en la resistencia de confinamiento en elementos de sección cuadrada y cuadrada de bordes redondeados, por la concentración de esfuerzos en las esquinas (20).

4.1 APLICACIÓN DE LOS POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO CFRP Y FIBRAS DE VIDRIO GFRP

La aplicación de los CFRP ha sido más común en elementos estructurales (hormigón armado) que los GFRP, los cuales presentan problemas de fatiga y de flujo plástico. La fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en la fabricación de materiales compuestos para las aplicaciones industriales; por sus buenas características mecánicas y su bajo costo.

Las fibras tejidas datan del siglo XVIII en Francia y la producción de fibra de vidrio continua se consiguió en 1938 en los Estados Unidos, formándose la compañía Owens-Corning Fiberglass; donde los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos se realizaron en compuestos de fibra de vidrio (19).

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtienen por fusión de la mezcla de estos materiales, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado. Entre las propiedades más sobresalientes que presentan los polímeros reforzados con vidrio GFRP, están:

- Alta adherencia fibra-matriz.
- Resistencia mecánica, tracción/densidad, superior a la del acero.
- Es aislante eléctrico aún en espesores reducidos.
- La fibra de vidrio es incombustible por naturaleza.
- Poco sensible a las variaciones de temperatura.
- Crea un puente de unión entre el vidrio y la matriz, lo que le confiere la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.
- Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.
- La utilización de los materiales compuestos en la industria de la construcción permite suprimir los puentes térmicos, dando lugar a un considerable ahorro de calefacción.
- Excesiva flexibilidad.
- Bajo costo.

Entre los métodos de fabricación se distinguen tres fases que son composición – fusión (materias primas finamente molidas, dosificadas con precisión y mezcladas homogéneamente), fibrado (el vidrio fundido en el horno es distribuido por canales y alimenta las hileras, que son baños de platino/rodio en formas prismáticas y agujereados), y ensimado (los filamentos tal como salen de la hilera son inutilizables directamente, ya que no hay cohesión entre ellos, no resisten la abrasión, sufren ataques de agua, y por tanto es necesario recubrirlos con una película ensimaje, con una temperatura del vidrio entre los 80 grados y 120 grados centígrados).

La fase de ensimaje es necesaria, pues de lo contrario se presentarían aspectos críticos, no habría cohesión entre los filamentos, no resistirían la abrasión ya sea consigo mismo, o con otras superficies, sería sensible al ataque del agua, originaría cargas electrostáticas, no se uniría químicamente con la matriz y finalmente no se adaptaría a los procesos de transformación.

Varios son los procedimientos que conducen a la producción de las fibras de vidrio, pero el principio es siempre el mismo, el estiramiento a altas temperaturas, por tracción o mecánica o por acción de fluidos en movimiento, de una veta o vena de vidrio fundido y su inmediata solidificación.

A la hora de elegir los diferentes constituyentes de un material compuesto es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Propiedades mecánicas de la pieza: que son función del porcentaje de refuerzo y orientación de las fibras. La resistencia del producto final es directamente proporcional a la cantidad de refuerzo que contiene.
- Propiedades químicas, eléctricas y térmicas: determinada por el tipo y formulación de la resina. Las principales resinas en las estratificaciones se distinguen por su grado de resistencia a la corrosión y al calor. La adecuada formulación a base de una o varias resinas, cargas, y pigmentos permite centrar las características de la pieza final.
- La elección de los materiales e imperativos inherentes al proyecto: Determina el proceso de fabricación. Una combinación determinada de materias primas, necesaria para la obtención de la pieza dada, limitan la elección del procedimiento a aquellos que permiten transformar con éxito y bajo costo las materias primas en el producto final.

- Obtención de una relación, calidad/costo que se exige un estudio óptimo de base sobre materias primas y procedimiento de transformación.

Las propiedades químicas de los materiales constituyentes de las barras de FRP, no fueron objetivo de estudio de este trabajo (5). Los materiales compuestos utilizados y probados en el desarrollo del trabajo experimental fueron donados y clasificados por el fabricante (7). Si fue importante el reconocimiento de las fases presentes en la matriz cementante de mortero, como es el caso de las pastas (CEMENTO + AGUA) que para efectos de análisis y estudios de resistencia y adherencia se identificaron con ayuda de la Prensa de 100 T para el ensayo a flexión de las vigas, el Microscopio Electrónico de Barrido, el Microscopio Estereoscópico y técnicas de arrancamiento para la evaluación de la adherencia.

4.2 MICROESTRUCTURA DE LA PASTA DE CEMENTO EN EL HORMIGÓN

La resistencia a compresión del hormigón a cargas externas es considerada como su propiedad más importante, ya que ofrece un panorama general de la calidad del hormigón, que está relacionada directamente con la estructura de la pasta endurecida; pues el proceso de adquirir resistencia comienza una vez se ha terminado el fraguado (20), y ha comenzado el endurecimiento de la matriz cementante formada por la mezcla de cemento y agua.

Aunque en términos generales los cementos y los hormigones están compuestos de minerales cristalinos y amorfos con propiedades ópticas similares a los materiales compuestos de minerales formadores de roca, familiares a todos los petrógrafos, las diferencias relacionadas con el método de fabricación, la química, y los factores dependientes del tiempo y los efectos ambientales hacen diferente el estudio petrográfico de estos materiales, tanto en su técnica, filosofía como en el enfoque.

La importancia de este numeral, radica en el hecho de dar a conocer las fases presentes en la pasta de cemento Pórtland; ya que la presencia de las pastas en la matriz cementante artificial, de cualquier hormigón ya sea simple, reforzado y reforzado adicionado interviene activamente en la adherencia y desempeño químico con cualquier material que se utilice como refuerzo.

La química del cemento es principalmente la química de los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados; y la composición potencial del cemento se calcula a partir de las cantidades medibles de óxidos que están presentes en el clínker; expresada en fórmulas como una suma de óxidos, utilizando abreviaturas para efectos prácticos.

El cemento Pórtland se produce por reacción a alta temperatura entre un material calizo y otro que contiene sílice, alúmina y algún Fe_2O_3 . En Tabla 4. están las abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes.

Tabla 4 Abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes (20).

NOMBRE DEL OXIDO	FÓRMULA	ABREVIATURA
Dióxido de Silicio	SiO_2	S
Oxido de Calcio	CaO	C
Oxido de Magnesio	MgO	M
Oxido Férrico	Fe_2O_3	F
Oxido de Sodio	Na_2O	N
Oxido de Potasio	K_2O	K
Trióxido de Azufre	SO_3	S
Agua (pérdidas por ignición)	H_2O	H

El producto conocido con el nombre de clínker portland, es un mineral artificial integrado por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos del calcio, que en el proceso de fabricación del cemento se muele después con el yeso (para controlar el

fraguado del cemento), con el objeto de obtener como producto final el cemento Pórtland (21).

Las principales fases en el clínker son el silicato tricálcico (C_3S), el silicato dicálcico (C_2S), el aluminato tricálcico (C_3A), y una fase ferrita, correspondiente a la serie de soluciones sólidas ($C_2F - C_2A$). ver Tabla 5. (20).

El clínker no se debe definir como cemento; corresponde a una etapa o fase incompleta del cemento, durante el proceso de producción de los cementos Pórtland.

También se encuentran muchos clínters en cantidades menores ($\leq 3\%$) de cal libre (CaO), periclusa (MgO) y sulfatos alcalinos (la abreviatura para el Dióxido de Manganeso no aparece especificada); y ha sido también postulada con frecuencia, la presencia de un material vítreo en cantidades del orden del 20% o aun mayores (investigaciones recientes indican muchas dudas sobre esta conclusión (21).

Las fases importantes no tienen una composición exacta; todas están modificadas por soluciones sólidas, ya sea de los óxidos comunes o de los componentes menores, que también se encuentran afectadas por las modificaciones en los procesos de fabricación del cemento, siendo los más importantes los procesos de machaqueo (fase inicial y anterior a la mezcla de las materias primas), trituración y calcinación del clínker.

En Tabla 5, están las fórmulas y abreviaturas de otros óxidos componentes del cemento no menos importantes en su proceso de fabricación.

Tabla 5 Otros óxidos componentes del cemento (20).

NOMBRE DEL OXIDO	FÓRMULA	ABREVIATURA
Oxido de Aluminio	Al_2O_3	A
Oxido de Litio	Li_2O	L
Oxido de Fósforo	P_2O_5	P
Oxido de Hierro	FeO	F
Oxido de Titanio	TiO_2	T

En la siguiente Tabla 6, están los componentes del cemento p rtland y sus proporciones aproximadas, presentes en las fases más importantes del proceso de hidratación de la pasta de cemento.

Tabla 6 Compuestos del Cemento Pórtland y sus proporciones aproximadas (20).

COMPUESTO	COMPOSICIÓN EN ÓXIDO ABREVIATURA	ABREVIATURA	CONTENIDO (%)
Silicato tricálcico	$3CaOSiO_2$	C_3S	20-70
Silicato dicálcico	$2CaOSiO_2$	C_2S	5-50
Aluminato tricálcico	$3CaOAl_2O_3$	C_3A	1-15
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaOFe_2O_3Al_2O_3$	C_4AF	1-17

4.2.1 FASES EN EL CLÍNKER

Entre las fases más importantes a nivel de micro-estructura presentes en el c nker se han detectado las siguientes (20, 21):

4.2.1.1 Silicato Tricálcico (C_3S).

La fase principal en el clínker del cemento Pórtland, es una forma de silicato tricálcico, descrita originalmente con el nombre de “Alita”, basada en el C_3S , que al hidratarse más rápidamente se encarga de la resistencia inicial, aproximadamente hasta los siete días, y ejerce gran influencia en el tiempo de fraguado.

4.2.1.2 Silicato Dicálcico (C_2S).

El Silicato Dicálcico puede presentarse en cuatro modificaciones polimórficas: $\alpha, \alpha', \beta, \gamma$, donde la fórmula γ es casi inerte, la β se hidrata a una velocidad que depende del tipo de estabilizador, la α' da muy escasa resistencia mecánica y la α no es hidráulica.

El Silicato Dicálcico se ha constituido en la segunda fase en importancia del clínker; normalmente se conoce con el nombre de fase Belita, y se hidrata más lentamente originando resistencias mecánicas más retardadas.

4.2.1.3 Fase Ferrita ($C_2F - C_6A_2F$)

Esta fase en el clínker del cemento Pórtland, es llamada también Brownmillerita, es una solución sólida que varía entre C_2F hasta C_6A_2F , y disminuye la temperatura de clinkerización a su porcentaje mínimo.

4.2.1.4 Aluminato tricálcico. (C_3A)

Esta fase no presenta modificaciones polimórficas, y los únicos efectos observados en el calentamiento del C_3A a 1500°C , en una cámara de difracción de rayos X a alta temperatura, son causados por la expansión térmica. Esta fase se conoce también con el nombre de Ettringita (23).

El compuesto C_3A no se encuentra totalmente puro, va acompañado de impurezas como SiO y MgO . También contribuye a una resistencia inicial alta con la desventaja de que el calor de hidratación es bastante alto; pero la característica más desfavorable se presenta en los cambios volumétricos del hormigón y la baja resistencia a los sulfatos. Su porcentaje oscila entre el 5 y el 15%.

4.2.2 . FASES MENORES

El óxido de calcio (CaO) y el óxido de Magnesio (Periclusa, MgO), son fases no deseables en el clinker del cemento pòrtland, porque pueden hidratarse lentamente, después que el cemento esta endurecido, provocando la expansión. La composición de la mezcla de materias primas debe ser tal que estas fases estén ausentes, o casi ausentes, en el producto final.

El óxido de calcio se halla presente con toda posibilidad en pequeñas cantidades en todos los clinkers de cemento pòrtland, en general por reacción incompleta. El MgO , cuando se presenta, deriva normalmente del CO_3Mg de la caliza original. El efecto perjudicial del MgO puede reducirse algo por medio de un enfriamiento rápido del clinker.

Las arcillas y pizarras usadas en la fabricación del cemento pòrtland suelen contener pequeñas cantidades de sulfatos y sulfuros, y el combustible usado contiene frecuentemente compuestos de azufres; de esta forma en el horno, a la temperatura de clinkerización, se produce el SO_3 . Este reacciona con los álcalis presentes, ya procedan de las materias primas o del combustible, para originar sulfatos alcalinos.

Los mencionados álcalis son el K_2O y el Na_2O , debido a que reaccionan con algunos agregados ocasionando una desintegración del hormigón. Estos álcalis inciden en la velocidad con que el cemento adquiere resistencia.

4.2.3 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL (Norma ASTM C 114).

Hay numerosos métodos de investigación que son especialmente adecuados al estudio del cemento pÓrtland. En este numeral se mencionan sólo algunos de los más importantes y trabajados durante el desarrollo de esta investigación.

4.2.3.1 Técnica Petrográfica.

Para el examen microscópico de los clÍnkers de cemento PÓrtland se emplean generalmente tres métodos:

El examen de muestras pulverizadas sumergidas en un aceite de índice de refracción conveniente.

Después de un procedimiento normalizado se coloca una pequeña cantidad del medio pulverizado en un porta objetos y se vierte sobre aquel cuyo índice vamos a determinar. Se coloca un cubre objetos sobre la mezcla y se calienta el porta objetos en una llama hasta que el medio se funde.

Las secciones delgadas son especialmente útiles cuando se trata de determinar la relación de los diversos constituyentes de una preparación clinkerizada.

Método de las secciones delgadas por transparencia.

Después de tener las secciones pulimentadas, se usa un iluminador vertical y un objetivo adecuado un cubre objetos, unido al tubo de un microscopio petrográfico, se puede examinar la muestra con luz reflejada o por transparencia, sin cambiar su posición en la platina del microscopio. El iluminador vertical consta de un reflector de un cristal plano, un filtro amarillo verdoso y una lámpara incandescente (para microfotografía se emplea una lámpara de arco).

Examen con luz reflejada de muestras pulimentadas y convenientemente atacadas.

Se establecen diferentes reactivos y técnicas de ataque según la naturaleza de las fases que se desean examinar de las muestras de clinker de cemento pulimentadas.

Entre algunos de los reactivos más utilizados están:

Mezcla de HNO_3 -alcohol isoamílico apropiado para los silicatos cálcicos.

El reactivo ácido oxálico-alcohol etílico al 95% alcanza a determinar por diferenciación el C_3A , ya que da a estos cristales un tono marrón rojizo, en un período de cinco a quince segundos, y no colorea ningún otro de los constituyentes.

La solución de bórax en agua es la única que ataca satisfactorialmente al CaA_3 .

La mezcla de $NaOH - Na_2HPO_4$ y el HF atacan el C_4AF .

4.2.3.2 Examen microscópico.

Como se indicó anteriormente, es posible identificar las fases de C_3S, C_2S , ferrita y posiblemente C_3A , en secciones pulidas observadas al microscopio. Una vez que se ha realizado esta identificación hay un corto espacio para tratar de medir las cantidades.

El primer método fue el de Rosiwal, donde el área de cada constituyente se estima midiendo las intersecciones hechas por cada constituyente sobre unas líneas igualmente separadas. Se idearon varios accesorios para facilitar este método, siendo el más popular la platina de integración, que mueve la muestra por medio de micrómetros. El método se ha vuelto una práctica normal, pero está sujeto a un grave error, porque deben localizarse con precisión los límites de cada grano.

En 1949 Chayes, F. (20) popularizó el método estadístico de Glagoler, que sustituye por la estimación de las áreas, las líneas por punto. Es necesario la conversión a porcentajes en peso para comparar los resultados con los obtenidos por otros métodos.

4.2.3.3 Absorción de infrarrojos FTIR

La espectrografía de absorción de infrarrojos ha sido extensamente usada para análisis cuantitativos en Química Orgánica, pero ha tenido poco empleo en análisis mineralógicos cuantitativos.

Midgley concluyó que los espectros de absorción de infrarrojos de los cuatro constituyentes principales, están bien establecidos y que dichos espectros difieren lo suficiente como para permitir intentar el análisis cuantitativo (22).

4.2.3.4 Difracción de Rayos X.

Con este método es posible medir:

El espaciamiento interpolar para identificar las fases

Las intensidades para cuantificar los porcentajes de las fases.

En relación con los métodos microscópicos estos diagramas proporcionan los mejores medios que actualmente se pueda utilizar para tales identificaciones. El análisis de estos diagramas, por diferentes métodos, se ha empleado también hasta cierto límite en el estudio de la estructura de los cristales en algunas fases.

La identificación completa de un compuesto cristalino en el microscopio, lleva consigo la medida de numerosas propiedades ópticas, lo que en el caso del cemento pórtland no es siempre posible.

Es importante recalcar que este campo de investigación merece un estudio más intenso, puesto que en el conocimiento de la estructura cristalina está la solución de muchos problemas de la industria, todavía por resolver.

Los cristales están generalmente muy finamente divididos, a menudo en partículas demasiado pequeñas para permitir medidas satisfactorias. También a veces están rodeadas de vidrio o contienen inclusiones. Por estas razones, los exámenes microscópicos no han sido adecuados para identificar positivamente todas las fases, y se han hecho indispensables métodos suplementarios.

4.2.3.5 Microscopio Electrónico y Micro-análisis de Rayos X

En la década anterior y actual, el Microscopio Electrónico y el Micro-análisis de Rayos X, se ha convertido en un instrumento autónomo y adaptable, habiéndose usado ya ampliamente en el examen de diversos materiales, publicados en varios artículos y revistas dedicadas al estudio de las fases en el hormigón simple.

Usando el Microscopio Electrónico de Barrido es posible identificar las fases de acuerdo a la morfología típica, y también hacer análisis químico localizado mediante microsondas de tipo EDS y WDS.

En relación con el Microscopio Electrónico de Transmisión, la aplicación por difracción electrónica al clínker de cemento pòrtland ha sido sugerida por Miller, que cree que este método tiene ventajas sobre la difracción por Rayos X por la posibilidad de seleccionar las partículas individuales en el fragmento de clínker que se desea examinar.

4.2.3.6 Análisis Espectrográfico

El uso del espectroscopio para el análisis cuantitativo de los elementos ha experimentado un rápido desarrollo en los últimos años. Sus aplicaciones han sido especialmente importantes en la determinación de elementos para los que los

métodos químicos son demasiados lentos o en aquellos en que las concentraciones son bajas.

El interés creciente que ha despertado este método ha hecho mejorar su técnica, habiéndose logrado con él una mayor exactitud y aplicación muy variada.

La intensidad del espectro de cualquier elemento es función de diversas condiciones, siendo la principal la concentración del elemento. El porcentaje de error en el análisis espectrográfico tiende a permanecer constante, independientemente de la concentración, mientras que en el análisis químico es el error absoluto el que tiende a resultar constante.

Así, para altas concentraciones, los métodos químicos son preferibles mientras que para concentraciones bajas, los espectrográficos frecuentemente dan mayor precisión.

En un estudio hecho por Helz, y Scribner (20), se estableció un método de determinación simultánea de ocho elementos en el cemento: *Na, K, Li, Mn, Ti, Mg, Fe y Al*. Con este método; al cual se le introdujeron importantes mejoras, un operador puede determinar por duplicado en un solo día, los ocho elementos antes mencionados en un número de muestras de cemento que puede ser de diez a dieciséis.

La exactitud es probablemente igual o mejor que la obtenida por los métodos de análisis químico corrientes. Los errores probables expresados en tanto por ciento de la concentración, varían entre 2 y 5 %, excepto para el potasio, en el que son algo mayores (20).

4.2.3.7 Análisis Polarográfico.

El método polarográfico de análisis químico fue desarrollado por Heyrovsky en 1925 (20). El método está basado en la interpretación de las curvas voltaje-intensidad que se obtienen cuando las soluciones de sustancias reductoras u

oxidantes, se electrolizan en una pila en la cual un electrodo consiste en mercurio, que gotea por un agujero muy fino de un tubo capilar de vidrio.

A partir de las características de tales curvas de voltaje-intensidad, se pueden determinar tanto la naturaleza como las concentraciones de las sustancias oxidantes o reductoras presentes en la solución.

El método no ha resultado totalmente satisfactorio y el tiempo requerido para la determinación de alúmina (Al_2O_3), es algo menor de un día.

4.2.3.8 Giraloscopio ó DRC

El Método del Diagnóstico Rápido del Hormigón DRC, es el Giraloscopio; que es un método antiguo, donde se identifican y cuantifican las fases utilizando microscopía óptica, lo que se aplicaba en 1982 en Materials Service Corporation en Chicago (donde el Ingeniero colombiano Jaime Moreno trabajó en el desarrollo del hormigón de alta resistencia y la técnica la implanto el filipino Arturo Nísperos que hoy preside la Sociedad Mundial de Microscopia). Hoy con ayudas de métodos y software de análisis de imagen se pueden determinar las fases microscópicas del hormigón (23). Este método se aplica en Colombia para realizar evaluaciones rápidas, económicas y de diagnóstico preliminar del hormigón endurecido, cuando se requiere una idea general de los problemas que presenta un hormigón y cuando las pruebas físicas no logran esclarecer las causas de los mismos (24).

Este método consiste en observar la totalidad de una sección delgada del hormigón sobre un proyector de diapositivas, permitiendo la inspección rápida de la estructura interna del hormigón, la distribución de los constituyentes y la presencia de vacíos o fisuras en el mismo. Es posible observar la apariencia de la pasta de cemento y la mineralogía de los agregados en el hormigón (25).

4.2.4 DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE FASES DEL CLÍNKER.

El método más importante y ampliamente utilizado, es obtener la composición de fases, a través de resultados químicos por medio del cálculo de Bogue. Este método al menos en su forma original, está sujeto a dos tipos principales de errores. En primer lugar la composición de fases obtenida es solo potencial, porque supone una cristalización de equilibrio. En segundo lugar, se presume que las fases principales tienen las siguientes composiciones exactas: C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF . Esta suposición es sólo aproximada, en especial en lo referente a la fase ferrita.

Naturalmente, es posible un cálculo más preciso si se conoce la verdadera composición de la fase ferrita. Si erróneamente se supone que la composición de la fase ferrita es C_4AF , el principal error introducido suele estar en el contenido de C_3A , cuyo valor calculado será alto si la relación molar Al_2O_3 / Fe_2O_3 de la fase de ferrita exceda a la unidad y bajo si es menor que uno (20). Se han sugerido también correcciones, basadas en suposiciones referentes a las fases de álcalis y también el SO_3 en el caso del clínker. Las incertidumbres inherentes al cálculo de la composición de fases a partir del análisis químico han llevado al desarrollo de métodos independientes de determinación. Los más importantes se basan en microscopía óptica y en la difracción de rayos X; la espectroscopía de los infrarrojos proporciona un método posible más.

Composición potencial. Cristalización en Equilibrio:

$$C_3S = 4.0710CaO - 7.6024SiO_2 - 1.4297Fe_2O_3 - 6.7187Al_2O_3$$

$$C_2S = 8.6024SiO_2 + 1.0785Fe_2O_3 + 5.0683Al_2O_3 - 3.0710CaO$$

que es lo mismo que $2.8975SiO_2 - 0.7544C_3S$

$$C_3A = 2.6504Al_2O_3 - 1.6920Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3.0432Fe_2O_3$$

Este método conduce a resultados erróneos, debido a la composición muy variable de los ferritos; si bien la composición de la fase ferrito puede determinarse independientemente, puede emplearse, sin embargo el cálculo modificado.

Los cementos colombianos en su mayoría Cementos Pórtland adicionados llegando hasta valores de un 35% en peso; situación que debe considerarse cuando se requiere utilizar la composición potencial por el método de Bogue, la cual no puede ser aplicada a cementos con adiciones (23)

La difracción de rayos X puede emplearse para las cuatro fases, es el método más seguro para las fases de aluminatos, pero es menos preciso para las fases de silicatos. Puede usarse infrarrojos, pero se requiere de un estudio minucioso de los resultados.

5 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON GFRP, CFRP Y EL ACERO CONVENCIONAL

P.V. Vijay y Hota V.S. GangaRao (26), en un trabajo experimental, evaluaron el comportamiento de vigas rectangulares de hormigón reforzadas con barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio GFRP, incluyendo modos de falla y respuesta a la deformación. Obtuvieron valores de resistencia, rigidez y propiedades óptimas del hormigón y de las barras de GFRP; en adición, el estado de absorción de energía y falla última de los GFRP en vigas de hormigón, curvaturas y en algunos casos la detección de posibles fallas catastróficas.

Se puede establecer una diferencia entre las respuestas de los miembros estructurales de hormigón sometidos a cargas de compresión y de tracción, y definir un criterio de deformación por deflexión, límites de falla, y tamaño de grietas; para ofrecer parámetros de diseño en términos de la deflexión y límites de curvatura para vigas de hormigón con GFRP.

A compresión se presentan mejor los modos de falla que a tracción, en vigas de hormigón reforzadas con GFRP, pues se da el aplastamiento del hormigón con una falla gradual y no la falla de las barras de GFRP. Los métodos de fabricación de barras de FRP y mantos de FRP, tienen influencia en la respuesta mecánica de las estructuras reforzadas o reparadas con ellos. Arup Maji Analilia, Robert Acree (27), estudiaron el comportamiento de vigas de hormigón reforzadas con FRP pultruidas; donde, describen los ensayos y resultados en vigas de hormigón con FRP utilizando encofrados de madera y los compara con los resultados teóricos de los métodos de diseño propuestos por el ACI en estructuras de hormigón reforzadas con acero convencional. Con base a la experimentación mencionada el comportamiento carga-deflexión, fue idéntico al usado en hormigón

reforzado, con excepción de las barras de FRP, pues presentan un comportamiento elástico lineal. Los resultados con las vigas fueron más dúctiles de lo predicho comparado con la información y cálculos teóricos, además el método de análisis se basó en la energías de deformación asumiendo el comportamiento no lineal para el hormigón.

Las vigas de hormigón reforzadas con FRP, presentan un comportamiento dúctil mayor del que se espera en vigas de hormigón reforzadas con acero, a pesar de la fragilidad natural de los FRP, garantizando una adherencia adecuada, para que la falla se de por aplastamiento del hormigón y no por la falla catastrófica de los FRP.

En la actualidad se siguen los métodos de los desplazamientos y aparecen sugeridos en el ACI 440, el boletín 14 del fib, Reporte Técnico No. 55 y el AC 125 del ICBO (International Conference of Buildings Officials) (17); pero vale la pena aclarar que los procedimientos de ensayo se siguen tal cual, y lo que cambia en los cálculos son las propiedades de los materiales involucrados, los métodos de fabricación y la funcionalidad de los mismos en la estructura, que serán definidos por el diseñador (28).

En la Figura 8 y en la Tabla 7 se tienen las características de comportamiento en comparación de la relación tensión-deformación en el vidrio, carbono y acero según R. Fyfe et al, donde se aprecia el comportamiento elástico del vidrio y del carbono en comparación con el comportamiento elasto-plástico del acero y los puntos máximos de deformación (29).

Figura 8 Propiedades de la resistencia a la tracción en el Vidrio,Carbono y Acero (29).

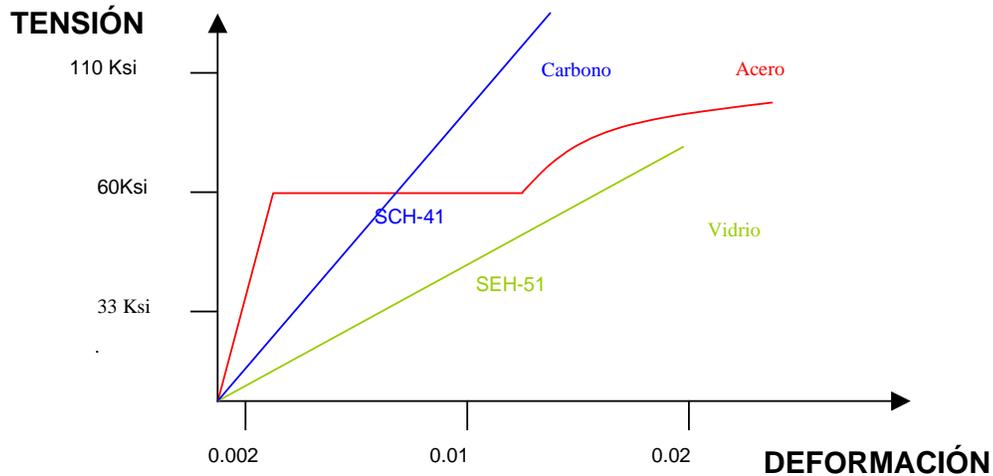


Tabla 7. Propiedades en sistemas de Vidrio y Carbono (30)

PROPIEDAD DEL COMPUESTO	SEH 51-VIDRIO	SCH 41-CARBÓN
Resistencia mínima de Tensión (ASTM D3039)	552 MPa (80 Ksi)	1.034 MPa (150 Ksi)
Deformación última	0,02	0,012
Módulo Elástico (Mínimo. ASTM D3039)	27.579 MPa (4.000 Ksi)	68.948 MPa (10.000 Ksi)
Resistencia a 90° de Orientación	34.5 MPa (5,0 Ksi)	34,5 MPa
Espesor de Diseño	1,3 mm/Capa (0,05 in)	1,0 mm/ Capa (0,04 in)
Coefficiente de expansión Térmica	7,74 e-06/C (4,3 e-06/F)	0,43 e-06/C (0,24 e-06/F)

En la industria de la fabricación del hormigón reforzado con barras de FRP ya existen clasificaciones que permiten la selección del tamaño de la sección transversal, longitud de las barras y traslapos entre las mismas que facilitan el diseño y construcción del hormigón reforzado con barras de FRP.

En la Tabla 8 se presentan algunos valores de resistencia y módulos para barras utilizadas como material de refuerzo y se presenta una clasificación estándar del ASTM para barras de FRP utilizadas como refuerzo interno.

Tabla 8 . Resistencia y Módulos para barras de refuerzo (30)

GRADO DE RESISTENCIA, KSI (MPA)	MÓDULO ELÁSTICO X10³ KSI (GPA)
Barras de acero 40 (276)	29 (200)
Barras de GFRP F60 (414)	E5,7 (39.3)
Barras de AFRP F80 (552)	E10,0 (68.9)
Barras de CFRP F80 (552)	E18,0 (124)

Comparando las guías de análisis y diseño (17, 30, 31); para la fabricación de elementos estructurales de hormigón reforzado, se puede observar como los pasos son similares; teniendo en cuenta, que en cada una de las ecuaciones se deben incluir de manera correcta los valores correspondientes a las propiedades físicas y mecánicas de uno y cada uno de los materiales involucrados.

En todo análisis, diseño y proyección de estructuras de hormigón reforzadas, rehabilitadas o reparadas con materiales FRP, se debe garantizar que la falla se origina por cualquier otro aspecto, excepto por problemas de adherencia ó de anclaje.

En el Anexo 1 se presenta una comparación del diseño de una viga rectangular de hormigón armado con acero convencional y con FRP, según las especificaciones Sismorresistentes NSR, que trata de mostrar cual sería el procedimiento normal de cálculo de área de refuerzo en una sección rectangular sencilla con acero y FRP. Luego se exponen las condiciones que se deben tener en cuenta para el diseño real por métodos de energía, que es el más recomendado para el diseño de hormigón armado con FRP, por las características de su comportamiento elástico.

En la actualidad se conoce un método de rociado para realizar el reforzamiento externo de estructuras de hormigón, que utiliza la técnica de rociado de polímeros reforzados con fibra de vidrio GFRP; de hecho, el equipo con el que se realiza la aplicación, se sirve de una técnica antigua de la industria automotriz (32). Se ha llegado a la conclusión que este método es el más adecuado para el reforzamiento externo, debido a que la posición en todas las direcciones de fibra es lo mejor para atender las diferentes solicitaciones.

Lo anterior no se debe constituir en el único criterio de aplicación, pues otros métodos de reforzamiento externo ofrecen condiciones deseables de respuesta en las estructuras, además de atender condiciones extremas del ambiente en que muchas veces se verán sometidas.

Se ha comprobado que la resina de poliéster, desarrolla una resistencia a la tracción de 25MPa y un módulo de 6 GPa aproximadamente. Al adicionarle a la resina fibra de vidrio distribuida al azar (Owens Corning (32)), se aumenta la resistencia a la tracción a 3400 MPa con un módulo de 81 GPa.

En la mayoría de las referencias bibliográficas los estudios de investigación y experimentación están orientados a determinar y definir de manera clara y precisa la respuesta de miembros estructurales sometidos a fuerzas de tracción, compresión y flexión y por tanto la respuesta a diferentes solicitaciones hablando del comportamiento a Flexión, Cortante y Compresión; pero no es común el definir el comportamiento torsional de estos miembros.

Algunos investigadores como A.Ghobarah, M.N. Ghorbel y S.E. Chidiac (33), han estudiado elementos estructurales de hormigón armado sometidos a fuerzas torsionales; y en especial, para examinar el comportamiento torsional de vigas de hormigón reforzadas con los nuevos materiales como lo son los FRP, específicamente CFRP y GFRP.

En cursos de Resistencia de Materiales se estudia la energía de deformación de un elemento sencillo sometido a torsión y las ecuaciones obtenidas para tal estudio, en forma, son similares a las ecuaciones para la misma determinación del elemento sometido a fuerza cortante, fuerza axial y momento flector.

Para el caso de rociado con fibras, la diferencia de resistencia después de la falla en el comportamiento de las vigas reforzadas con CFRP y GFRP es muy pequeña; debido, al poco confinamiento que ofrecen las fibras por la configuración rectangular de la sección.

5.1 ESTUDIO DE LOS FRP EN MORTEROS Y HORMIGONES

En la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín se han desarrollado cuatro trabajos de grado que evalúan los FRP en la repotenciación y reforzamiento de paneles y elementos estructurales de hormigón armado (2, 3, 4, 5).

Las características del material de refuerzo con las que se desarrollaron las tesis “Morteros Emulsificados y algunas aplicaciones” (4) y “Estudio de algunos materiales plásticos con fibras de vidrio y aramida y sus aplicaciones a la ingeniería” (5) que también se aplicaron en el desarrollo de este trabajo son las siguientes:

NOMBRE:	Anti Static Fiber Reinforced Polyester
APARIENCIA:	Acabado de superficie áspera para dar un incremento a la tracción y a la adherencia.
DIÁMETROS:	De 4.49 mm a 21.86 mm
PLANA:	Espesor de 5.0 mm Ancho de 29.0 mm
PESO:	0.78 Kg./m
DENSIDAD:	76% por peso (mínimo)

TENSIÓN (D 638 ASTM):	900 MPa.
MODULO DE TENSIÓN: (D 638 ASTM)	44 GPa.
MÁXIMA CARGA A TENSIÓN:	35 Ton.
CARGA DE CORTE:	6.3 Ton.
MÍNIMO RADIO DE CURVATURA:	700 mm.

En el estudio de los morteros emulsificados (4) se vaciaron paneles con espesores óptimos utilizando como refuerzo barras de FRP como se puede observar en la Figura 9; los cuales fueron sometidos al ensayo de Resistencia a la Flexión como se ve en la Figura 10

Figura 9. Páneles de espesor óptimo reforzados con barras de FRP (4)

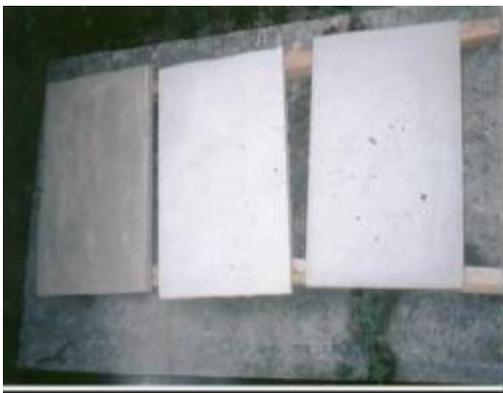


Figura 10. Resistencia a la flexión de los páneles (4)



Observaciones importantes del estudio de los paneles reforzados con barras de FRP, permiten concluir que el comportamiento de los paneles reforzados es similar al de los paneles sin refuerzo; en el sentido, que la deflexión es menor en los paneles con adición de emulsión. En este caso la disminución en la deflexión es de un 15% para paneles de refuerzo circular y un 56% en paneles de refuerzo

plano en promedio (4). Los resultados están resumidos en la Figura 11 y Figura 12.

La resistencia a la flexión de los paneles de mortero emulsificados reforzados con GFRP de sección circular es en un 12% menor que la de morteros sin emulsión, mientras que para elementos de refuerzo del mismo material pero de sección plana la resistencia a flexión permanece prácticamente constante (aumenta en un 4% (4)).

Figura 11. Carga vs. Deflexión en paneles con refuerzo FRP circular (4)

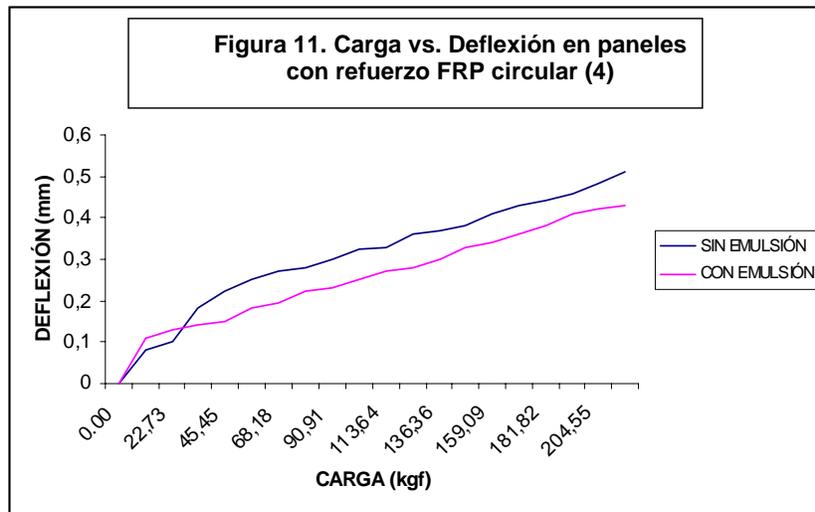
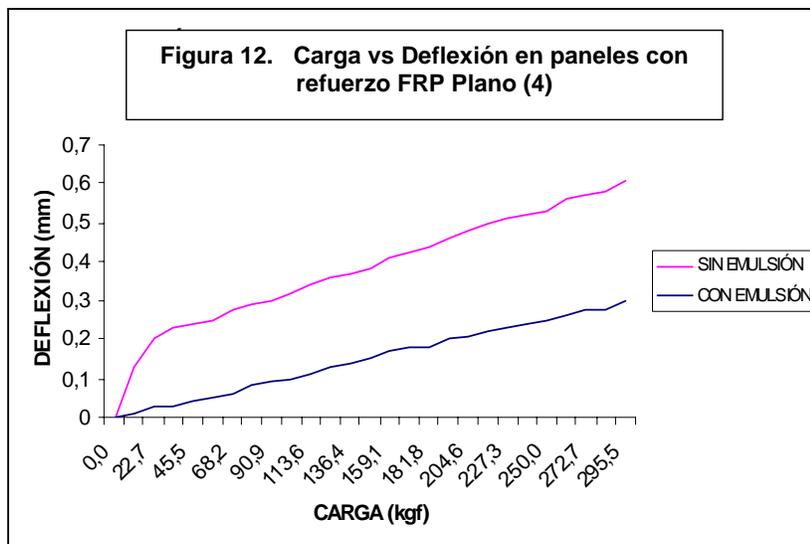


Figura 12. Carga vs. Deflexión en paneles con refuerzo FRP plano (4)



Como recomendación importante se sugiere hacer un estudio más detallado con este tipo de material de refuerzo y estudiar la probabilidad de que el refuerzo de sección plana presente un mejor desempeño en estructuras sometidas a flexión, que el refuerzo de sección circular; y hacer además un estudio de costos y beneficios.

En la Tabla 9, se presenta el resumen y variación de la resistencia a la flexión de los paneles reforzados y evaluados en la (4).

Tabla 9. Resumen de la resistencia a flexión de paneles reforzados (4).

REFUERZO	MÓDULO DE ROTURA (MPa)		
	Sin emulsión	Con emulsión	Variación
CIRCULAR	2,43	2,11	-13,0%
PLANO	10,01	10,38	+3,7%

Al estudiar algunos materiales plásticos reforzados con fibras de vidrio y aramida y sus aplicaciones en la ingeniería (5), los ensayos presentaron resultados comparables con las especificaciones dadas por el fabricante (7); además, en algunas ocasiones permitieron realizar el paralelo con el acero de refuerzo. Tales pruebas fueron:

Densidad.

Análisis de imagen.

Dureza.

Ensayo de Flexión (Norma ASTM D4476).

Resistencia a Cortante (Norma ASTM D4475).

Área de fibras.

Porcentaje de fibras

En la Figura 13, a Figura 28 se observa por medio del análisis de imagen la distribución de las fibras tanto longitudinales como transversales en la matriz polimérica.

VISTA LONGITUDINAL PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE ARAMIDA (ARAPREE) (5)

Figura 13. Aumento 10X

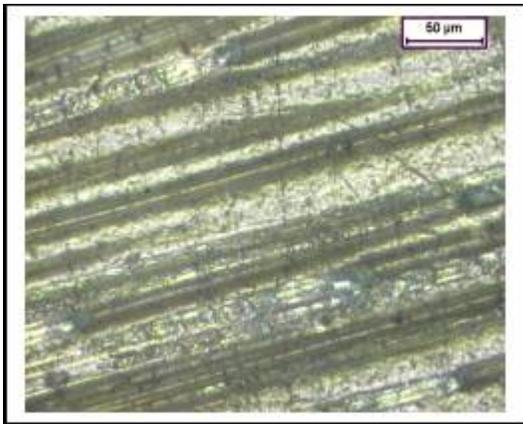
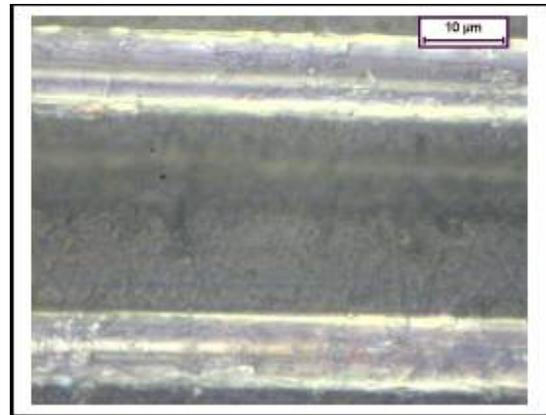


Figura 14. Aumento 50X



VISTA TRANSVERSAL PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE ARAMIDA (ARAPREE) (5)

Figura 15. Aumento 5X

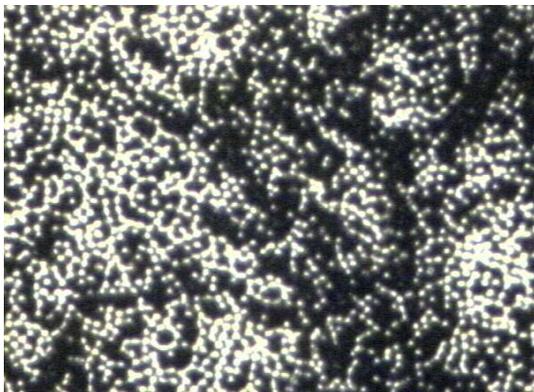
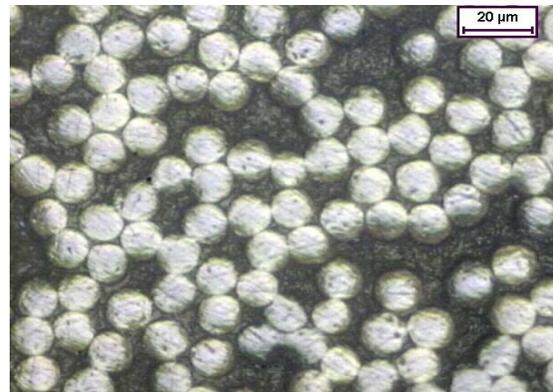


Figura 16. Aumento 20X



**VISTA LONGITUDINAL PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO
(DURGLASS) (5)**

Figura 17. Aumento 5X

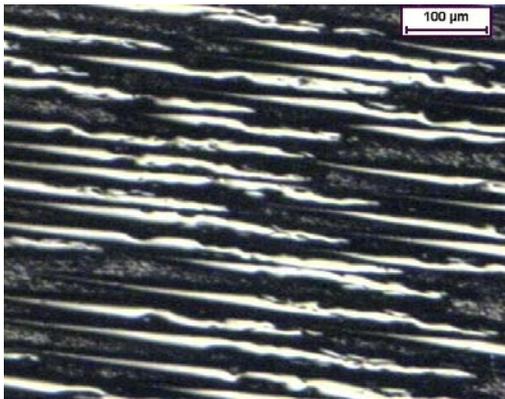
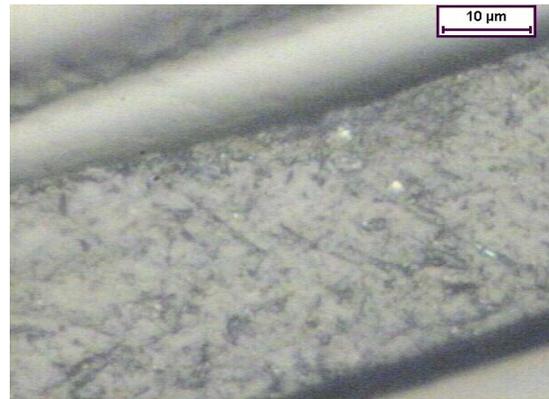


Figura 18. Aumento 50X



**VISTA TRASVERSAL PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO
(DURGLASS) (5)**

Figura 19. Aumento 5X

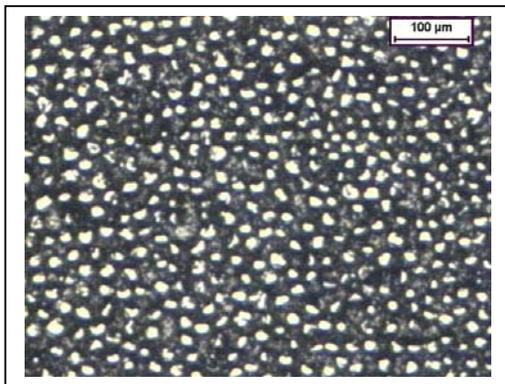
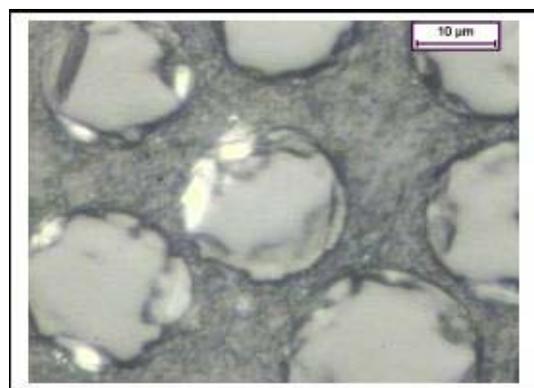


Figura 20. Aumento 50X



La distribución uniforme es una condición importante para garantizar una buena respuesta de los FRP a las sollicitaciones; ya que las fibras son las encargadas de

aportar la resistencia, por lo tanto, una buena homogeneidad se verá traducida luego en un buen comportamiento mecánico del material.

En las figuras se observa una distribución de las fibras al interior de la matriz que son utilizadas como refuerzo de los materiales plásticos estudiados.

Las fibras de refuerzo de **Durglass** presentan una forma redondeada más definida que las fibras de Aramida como refuerzo del **Arapree**.

Los resultados de dureza del material reforzado con fibras Durglass y arapree (5) aparecen en la Tabla 10 y la Tabla 11 que se presentan a continuación:

Tabla 10. Dureza Arapree (5)

MATERIAL REFORZADO CON FIBRA DE ARAMIDA				PROMEDIO
Transversal	97	100	100	99
Longitudinal	115	115	116	115

Tabla 11. Dureza Durglass (5)

MATERIAL REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO				PROMEDIO
Transversal	24	24	24	24
Longitudinal	15	15	15	15

De este estudio se puede concluir que al aumentar la dureza en general se aumenta la fragilidad y se pierde tenacidad, del mismo modo al aumentar la dureza aumenta la resistencia a la tracción y disminuyen el alargamiento, la resistencia al impacto y la maquinabilidad.

Según las especificaciones, el rango de dureza para materiales de matriz polimérica se encuentra entre 70 y 100 de la escala Rockwel M.-

En la Tabla 12 y Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a la flexión en probetas Arapree y Durglass.

Tabla 12. Ensayo de flexión (Arapree) (5)

Probeta	Ancho mm	Espesor Mm	Longitud Mm	Carga Max Kgf	Flecha Mm	Módulo de Flexión Kgf/mm ² Gpa		Módulo de Ruptura Kgf/mm ² GPa	
1	4,80	2,10	63,8	33	5,60	8606,54	84,34	149,19	1,46
2	4,70.	2,32	63,8	36	4,95	8045,21	78,84	136,19	1,33
3	4,90	2,23	63,8	52	4,60	13506,32	132,36	204,23	2,00

Tabla 13. Ensayo de flexión (Durglass) (5)

Probeta	Ancho mm	Espesor Mm	Longitud Mm	Carga Max Kgf	Flecha mm	Módulo de Flexión Kgf/mm ² GPa		Módulo de Ruptura Kgf/mm ² GPa	
1	4,80	4,42	63,8	48	4,20	1790,14	17,54	48,99	0,48
2	7,90.	4,40	63,8	72	3,00	2315,41	22,69	45,05	0,44
3	7,10	4,40	63,8	79	2,45	3461,36	33,92	55,00	0,54
4	6,80	3,90	63,8	77	2,30	5388,43	52,81	71,25	0,70

Evaluando los resultados se puede observar que el material no presenta fluencia lo que implicaría colapso de la estructura si se supera el límite máximo de carga.

Figura 21. Ensayo de Flexión

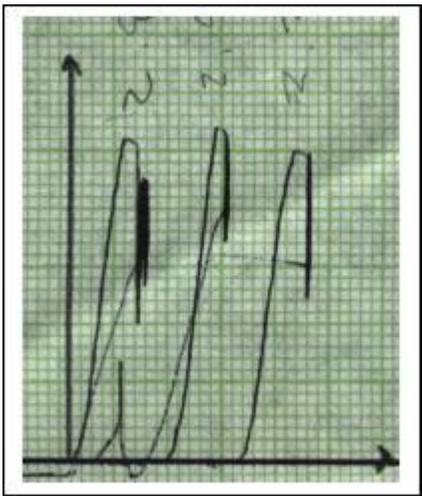
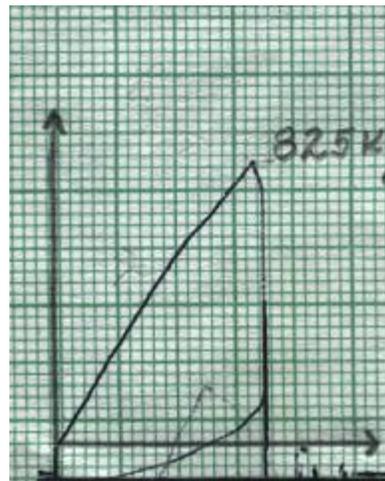


Figura 22. Ensayo a Cortante



En comparación con el acero, que presenta una falla dúctil; el FRP presenta una falla frágil; esto no significa que el material FRP se encuentra en desventaja, ya que éste último formando un compuesto con la matriz de hormigón, ofrecen una resistencia de carga última mayor y un comportamiento dúctil similar o mejor que el de estructuras de hormigón reforzadas con acero convencional.

Según las especificaciones del fabricante, la cortante interlaminar del Durglass presenta un valor de 45MPa, lo que indica que los valores encontrados se acercan y toman validez al tener como referente la especificación dada.

Adicionalmente se puede afirmar que debido al desprendimiento que se presenta entre las fibras de refuerzo y la matriz polimérica, los FRP presentan una falla por medio de placas o láminas (34, 35) Las cuales se generan de manera horizontal hasta alcanzar los extremos de la muestra.

En las referencias 4 y 5 se determinó la resistencia a tracción en las barras de FRP; ya que esta propiedad, es considerada como una de las características principales de las barras de FRP en comparación con el acero de refuerzo, por lo cual fue de gran interés la realización del ensayo para establecer un paralelo entre ambos materiales.

Inicialmente se realizó un ensayo similar al que se realiza en barras de acero convencional en Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Minas. Se utilizó la prensa de 100 T de capacidad de carga (Tinius Olsen), y la prueba fue realizada sin éxito, ya que al aplicar la carga de tracción a las barras de FRP no se presentó un buen agarre entre las mordazas y la barra.

Lo anterior produjo un deslizamiento del material ensayado y se presentó falla por compresión en la zona de anclaje de los extremos de las barras de FRP. Se consultó la norma ASTM D638 (34), la cual propone un procedimiento adecuado para la realización del ensayo a tracción.

La prueba a tracción sugiere colocar el espécimen simplemente apoyado con una luz interior igual a 2/3 de la longitud total de la probeta. En el centro de la luz se aplica una carga gradual y concentrada hasta que la probeta falle; observando la formación de fisuras y el descascaramiento del hormigón.

A continuación se presentan los valores de resistencia a tracción suministrados por el fabricante,(7):

Arapree: 1400 MPa

Durglass: 1000 MPa

La resistencia a tracción de un acero de refuerzo convencional (NTC-2289) presenta un valor de 422MPa. (29) y para estructuras de hormigón, se encuentra una diferencia de valores notable, en cuanto a densidad se refiere; pues, la densidad del acero es de 7.86 g/cm^3 , lo cual supera en tres veces el valor obtenido para la densidad de los FRP ensayados.

Al tener un material menos denso se presentan ventajas significativas en el proceso constructivo de estructuras reforzadas con FRP:

Manejabilidad del material.

Menor peso propio de las estructuras (reducción de la carga muerta, estructuras ligeras).

Facilidades de transporte, lo que implica reducción en los costos.

Teniendo en cuenta la densidad del hormigón, la cual es 2.4 g/cm^3 que equivale casi al doble de la densidad de los plásticos reforzados con fibra ensayados, se debe considerar que el material de refuerzo (FRP) tiende a flotar durante el proceso de vaciado y curado por presentar una densidad menor. Para evitar este efecto se deben colocar pequeños anclajes a la formaleta, con el objeto de fijar la posición del refuerzo en el interior, durante el estado fresco del hormigón.

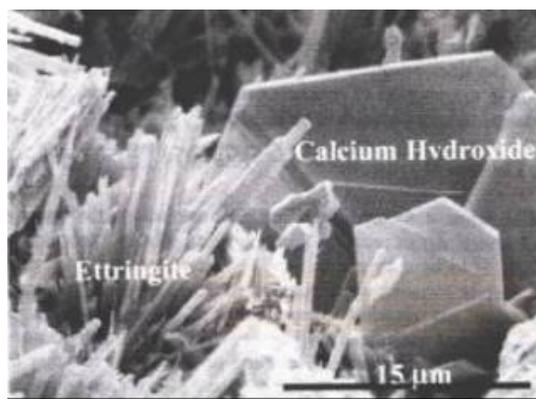
5.2 CARACTERIZACIÓN MICRO-ESTRUCTURAL DEL MORTERO FRP

Existen diversas tecnologías cuyo objeto fundamental es encontrar el verdadero estado de los elementos constituyentes de una matriz de hormigón roca artificial (hecha por el hombre), descubrir las potenciales propiedades de los agregados finos y gruesos, cementos y adiciones que se van a utilizar en una determinada mezcla de hormigón; y así poder desarrollar un material que actúe y responda a las necesidades que se ha diseñado, garantizando un buen desempeño durante su vida útil.

Técnicas de Petrografía en el hormigón, han permitido desarrollar una nueva técnica de microscopía en el estudio de la apariencia y propiedades del hormigón (36) y otros métodos de Evaluación No Destructiva END, se emplean para la evaluación del hormigón reforzado y preesforzado y son más confiables si incorporan la tecnología de Proyección de Imagen, de extensa aplicación en campos como la Biomedicina, la Geofísica y la evaluación no destructiva de metales, cerámicas y compuestos.

El método de Microscopía Electrónica de Barrido, proporciona enormes ventajas para la caracterización del hormigón, cemento y microestructura del agregado, y en lo que es más importante aún, en la interpretación de causas del deterioro del hormigón.

Figura 23. MICROGRAFÍA 1. Pasta de cemento en SEM (37)

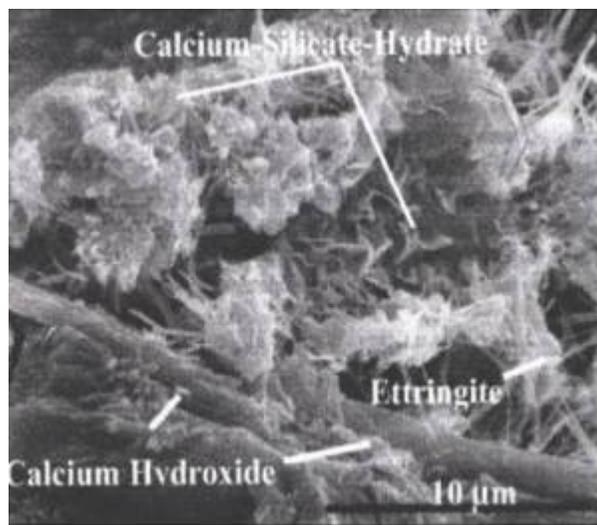


En la Micrografía 1 se observan los hexágonos de la fase Portlandita y las agujas de la fase Ettringita, que corresponden a la vista en el Microscopio Electrónico de Barrido de una pasta de cemento.

La influencia de medios agresivos sobre propiedades mecánicas y la estructura de materiales plásticos reforzados, se ha desarrollado en las áreas de laminados, caracterización, estructura y propiedades. Se ha utilizado la técnica que utiliza el Microscopio Electrónico de Barrido, combinada con microanálisis de rayos X EDX, para el estudio micro-estructural de los compuestos.

Los estudios han revelado diferencias en la distribución del refuerzo en la matriz, en las fases presentes en los compuestos, así como la interfase matriz- refuerzo; y las propiedades mecánicas se han evaluado considerando la micro dureza obtenida para cada uno de los materiales relacionándola en cada caso con la micro estructura obtenida.

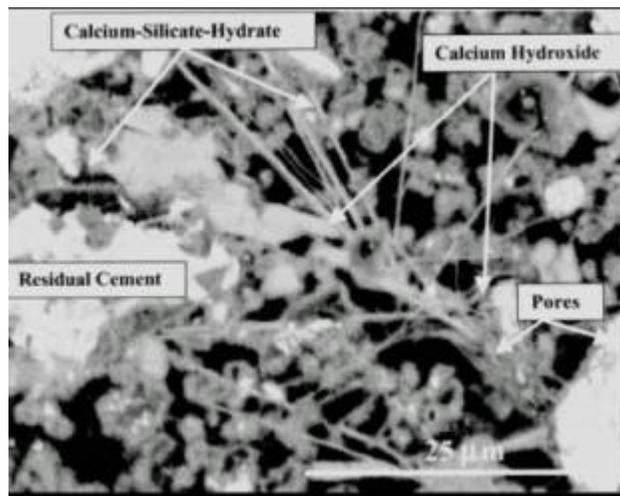
Figura 24. MICROGRAFÍA 2. Fases en la pasta de cemento (37)



En estudios de pastas de cemento reforzadas con aleaciones (Micrografía 3) de aluminio AA6061, obtenida por atomización con argón y material de refuerzo de partículas de TiB₂, obtenidas por reacción, permiten concluir que la micro dureza aumenta significativamente con el porcentaje de refuerzo (38).

La reactividad entre las partículas de refuerzo y la matriz es muy baja, sin embargo es suficiente para crear una interfase que permita la transferencia de las tensiones mecánicas.

Figura 25. MICROGRAFÍA 3. Fases de la aleación. (38)



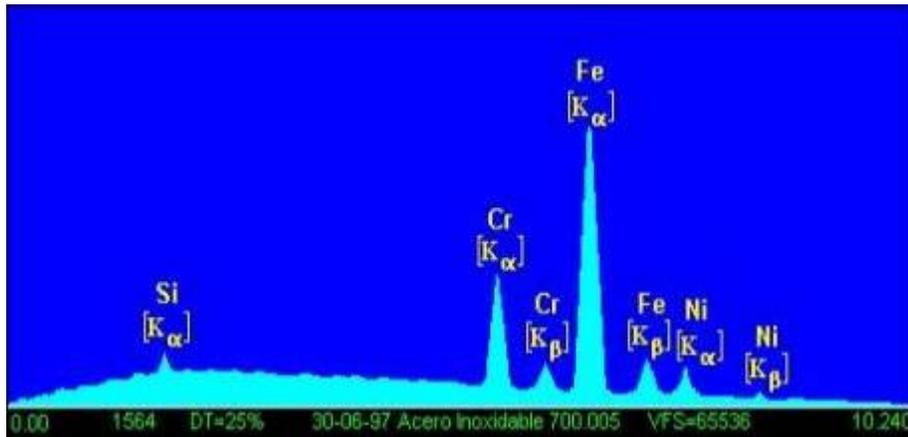
En el hormigón las fracturas y otros aspectos micro estructurales se analizan por Microscopía Electrónica de Barrido, para estudiar la distribución del refuerzo, en todos los casos, por una parte, y la unión entre la matriz y el refuerzo por otra.

La técnica de Microscopía Electrónica de Barrido y técnicas de microanálisis de Rayos X Figura 26 han sido desarrolladas para la compleja micro estructura del hormigón, y proporciona imágenes con definiciones sub-micrométricas.

La combinación de la información en la retro-dispersión del electrón y las imágenes de Rayos X, facilita una mejor y adecuada caracterización de la micro-estructura de sus compuestos (hormigón), ya que se revelan las diferencias en la distribución del refuerzo en la matriz, en las fases presentes en los compuestos, así como la interfase de la matriz y el refuerzo.

Los análisis de Rayos X, permiten tener la información química de los componentes de la matriz cementante. La Figura 26, presenta una evidencia típica de los componentes de la pasta de cemento.

Figura 26. Microanálisis de Rayos X. (37)



Las propiedades mecánicas se han podido evaluar considerando la micro dureza obtenida y permite la evaluación de los problemas de durabilidad y en predicción de la vida de servicio del hormigón.

En el análisis con el Microscopio Electrónico de Barrido, usando detectores de electrones retro-proyectados BSE y Rayos X, se requiere de una superficie altamente pulida para optimizar la imagen; ya que, superficies rugosas disminuyen las propiedades de las imágenes por reducción de contraste; por tanto las pruebas requieren del uso de una resina epóxica, que impregna los poros del material. Luego la superficie es pulida usando pasta abrasiva compuesta por partículas de diamante aglomerada con polímero.

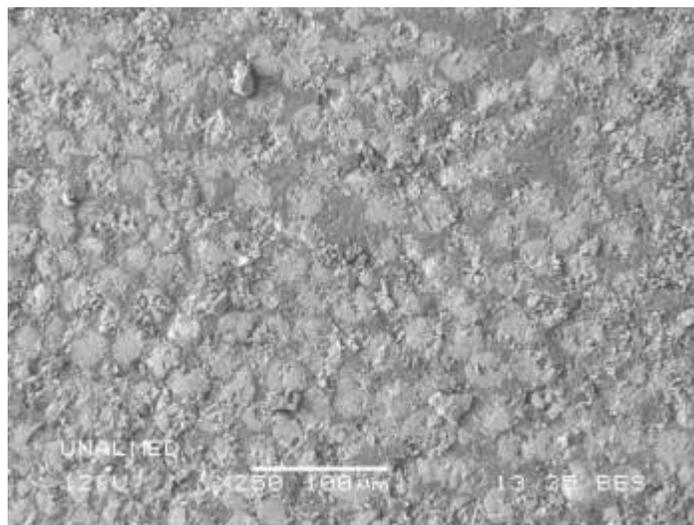
A los especímenes observados en el Laboratorio de Microscopía Avanzada de la Universidad Nacional se les aplicó un recubrimiento de oro con espesor aproximado de 100\AA (Probetas de morteros reforzadas con FRP y Acero).

La aplicación del microscopio, permite caracterizar el cemento y la micro estructura del mortero; como también la evaluación de los problemas de durabilidad del mortero, pudiendo predecir la vida útil del hormigón.

Las fases presentes en la matriz cementante del hormigón, la Ettringita y Portlandita, entre otras, son fácilmente identificables por este método. Lo que permite al diseñador conociendo su mezcla, optimizar la adición de otros compuestos que retracen la reacción química de una de las fases y den al hormigón un fraguado más uniforme y controlado, de tal modo que, los procesos de curado sean programados de acuerdo con las exigencias de preparación y colocación.

Al observar en detalle la micrografía 4 se puede observar la distribución de las fibras de las barras de FRP en la matriz polimérica, que según el análisis de imagen para el Durglass (5) se determinó que el porcentaje de fibra se encuentra en el rango de valores del 50% hasta el 60%. Para el Arapree el intervalo de valores va desde el 55% hasta el 70%.

Figura 27. MICROGRAFÍA 4. Distribución de fibras en el FRP



Durante la realización del ensayo y la determinación del porcentaje de fibras de cada uno de los materiales estudiados se pueden presentar diversas causas de error, dentro de las cuales se resaltan (5):

- En ocasiones se encuentran fibras incompletas dentro del área analizada, lo cual afecta el número de fibras presentes en un área determinada.
- El tamaño de las fibras es muy pequeño, por lo cual se debe utilizar una escala de medidas en micras (μm) lo que exige tener una alta precisión al momento de medir los diversos diámetros para cada una de las fibras.
- La observación microscópica se debe realizar en diversos puntos de la probeta, lo cual exige uniformidad de la misma. Adicionalmente se deben observar muestras diferentes para lograr así resultados aceptables, porque aunque los procesos de fabricación son bien controlados, pueden presentarse diferencias entre un lote y otro.

Es necesario tener presente que las fibras son las encargadas de aportar mayor resistencia al material compuesto y la matriz es la encargada de unir las fibras para que dicho material trabaje uniformemente, siendo de gran importancia una relación porcentual adecuada de fibra-matriz en los plásticos reforzados con fibras y los FRP con la matriz cementante, para obtener un excelente comportamiento mecánico ante la aplicación de cargas. Las formas cristalinas son en la actualidad encontradas en regiones de alta porosidad o en vacíos de aire.

También se pueden observar algunos cristales rodeados de agujas de Ettringita; cuya observación se hace mucho más clara en los espacios ya sean poros o fisuras, como planos de falla.

En la Figura 28, Figura 29 y Figura 30 se observa el estado de los morteros y hormigones del material de refuerzo FRP antes de la falla; cuyas apreciaciones dejan concluir que la adherencia es buena entre la matriz cementante y el material FRP (la adherencia se ha determinado de manera cualitativa con ayuda del Microscopio es Estereoscópico LEICA)

Figura 28. Sección lateral de la probeta (Durglass)



Figura 29. Sección transversal de la probeta (Durglass)

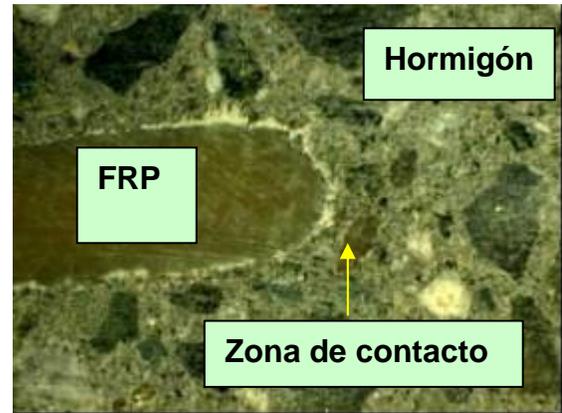
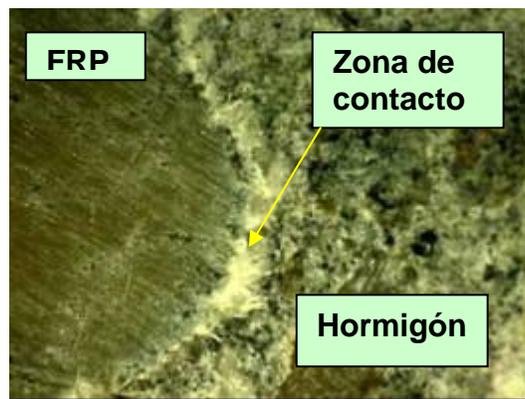


Figura 30. Sección transversal de la probeta Arapréé



Después de someter las probetas reforzadas con FRP (Durglass y Arapréé) al ensayo de la resistencia a la flexión (Capítulo 8.), se puede observar como el material de refuerzo queda cubierto de mortero y algunas fibras de las barras de FRP sufren desprendimiento quedando adheridas a la matriz cementante del hormigón.

6 ADHERENCIA EN EL MORTERO REFORZADO

En la ingeniería civil el tema de la adherencia entre el hormigón y el material de refuerzo, es poco estudiado en Colombia; pero a nivel internacional se conoce un modelo con base en la Teoría de Mezclas Básicas y desplazamiento relativo entre las distintas fases que intervienen en un material compuesto, para la evaluación de la adherencia; que estudia la transferencia de esfuerzos entre la matriz (hormigón) y el refuerzo, teniendo en cuenta los diversos constituyentes que conforman un material (39).

En el caso particular se consideran dos materiales: mortero y refuerzo. Esta teoría de mezclas de sustancias básicas permite tener en cuenta los diversos constituyentes de un material y la interacción entre los mismos.

La hipótesis principal en la que se fundamenta el modelo, es que la deformación de todos los materiales que intervienen en el compuesto son iguales; y es válido para barras de acero en una matriz de mortero (mortero armado) despreciando los fenómenos en los extremos de las barras de refuerzo; y la ecuación del modelo no es válida para el caso en que se produzca deslizamiento entre el refuerzo y el mortero.

El deslizamiento se produce en el instante en que la tensión cortante máxima admisible de la interfase entre el mortero (matriz) y el refuerzo es superada.

6.1 MODELO CONSTITUTIVO PARA MATERIALES COMPUESTOS

Este modelo se aplica a los materiales compuestos, que como es sabido están formados por diferentes tipos de sustancias inorgánicas y orgánicas; y para el

caso en particular, el mortero armado se considera como un material compuesto bifase.

Debe ser claro que las características mecánicas de los materiales compuestos dependen de sus propiedades intrínsecas y extrínsecas como son:

- Característica del proceso de fabricación.
- Tamaño de los microporos y su distribución.
- Microfisuras
- Estados tensionales iniciales.

Y además de que cada una de las sustancias componentes que integran el compuesto condicionan con su ley constitutiva el comportamiento del conjunto en fin de la proporción del volumen en que participan y su distribución morfológica en el compuesto.

Entre las teorías que permiten simular el comportamiento constitutivo de los materiales compuestos, se considera adecuada para la simulación del comportamiento de materiales compuestos en régimen lineal y con ciertas modificaciones permite simular el comportamientos una vez superado el límite de proporcionalidad del material.

La Teoría de Mezclas fue estudiada por Trusdell y Toupin (1960) que dieron bases al trabajo de Ortiz y Popov (1982) y el de Green y Naghdi (1965) para materiales bifase. El modelo representa el comportamiento constitutivo de un material compuesto de “n” fases.

Los Fundamentos de la Teoría de Mezclas Clásica permite que para “n” componentes, permite considerar la combinación simultánea de comportamiento de las diversas fases de un compuesto”. En el caso de vigas de mortero reforzadas con barras de FRP, la Teoría de Mezclas Clásica es adecuada para

simular este material compuesto; ya que, presentan un comportamiento en paralelo entre materiales con refuerzo de fibras largas (mortero armado con barras de FRP).

La Teoría de Mezclas Clásica se basa en la mecánica del sólido continuo local y es adecuada para explicar el comportamiento de un punto de un sólido compuesto. Se basa en el principio de interacción de sustancias componentes que constituye el material, considerando las siguientes hipótesis:

1. En cada volumen infinitesimal de un compuesto participan un conjunto de sustancias componentes.
2. Cada componente contribuye en el comportamiento del compuesto en la misma proporción que su participación volumétrica.
3. Todos los componentes poseen la misma deformación (Ecuación de compatibilidad).
4. El volumen ocupado por el componente es mucho menor que el volumen total del compuesto.
5. Existe una distribución uniforme y homogénea de todas las sustancias en una cierta región del compuesto.
6. La interacción entre las diferentes sustancias componentes, con su respectiva ley constitutiva, determinan el comportamiento del material compuesto, y dependen del % en volumen ocupado por cada componente y de su distribución en el compuesto.

Las anteriores hipótesis, permiten combinar materiales con comportamientos diferenciados (elástico, elasto-plástico, etc) donde cada uno de ellos presenta un comportamiento evolutivo gobernado por su propia ley (Grenn y Naghdi, 1965) (Trusdell y toupin, 1960) (Ortiz y Popov, 1982) (Oller y al., 1996).

Una hipótesis importante establece que se cumple la siguiente condición de compatibilidad bajo la hipótesis de pequeñas deformaciones para cada una de las fases del material compuesto (39):

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_1 = (\varepsilon_{ij})_2 = \dots = (\varepsilon_{ij})_n$$

ε_{ij} (ε_{ij})_n : representan las deformaciones del conjunto y de la componente i-ésima del material respectivamente

Lo importante en el caso de la adherencia del mortero con barras de FRP, utilizando la Teoría de Mezclas Clásica, es modificar la misma, mediante una propuesta para el tratamiento del deslizamiento entre el refuerzo y el mortero.

Partiendo de la combinación e interacción de sustancias básicas que conforman el compuesto, se considera que en cada punto del material en análisis, participan todas las sustancias componentes a la vez y cada una de ellas en su propia ley constitutiva y en la proporción de volumen asignada.

Todos los componentes del compuesto deben satisfacer la condición de compatibilidad cinemática. (La deformación total en un punto es igual para todos los componentes). Esto es válido para materiales de matrices con fibras largas, despreciando los fenómenos en los extremos de las fibras. (para el caso de los materiales compuestos reforzados con fibras cortas la ecuación de compatibilidad no se cumple). (Oller 1995, Car 1998).

Tampoco es válida en el caso de que se produzca un deslizamiento relativo entre las fases del material (mortero-barras FRP). Situación que no se presentó en las vigas rectangulares a escala reducida en el Laboratorio de Estructuras al momento de la falla.

En el caso de matriz y refuerzo (acero) se tiene un comportamiento no lineal complejo, debido a que se produce un deslizamiento del refuerzo, motivado por la pérdida de la adherencia entre matriz y refuerzo.

El movimiento relativo entre mortero-acero produce una pérdida de rigidez en el conjunto, que se refleja en una disminución de los parámetros mecánicos del

compuesto, sin que ocurra rotura en la fase del refuerzo (Hild 1994). Esta situación se evidenció al momento de fallar las vigas rectangulares a escala reducida, reforzadas con acero.

La modificación de la teoría desarrollada se basa en la mecánica de los medios continuos y consiste en introducir en la ecuación constitutiva un comportamiento basado en el movimiento relativo de cuerpo rígido que se verifica entre la fibra y la matriz.

Este fenómeno de deslizamiento presenta sus características:

1. Pérdida de rigidez global debido a la disminución de la colaboración de la fibra en la matriz.
2. Deslizamiento relativo irreparable entre fibra y matriz.

Si ocurre el deslizamiento entre el refuerzo y matriz no cumple con la condición de compatibilidad impuesta por la teoría de mezclas de sustancias básicas; que trae como consecuencia directa la imposibilidad de que la matriz transfiera esfuerzos a la fase de refuerzo (FRP); esto significa que el refuerzo no es capaz de aumentar su estado tensional por causas atribuibles a la zona de interfase refuerzo-matriz.

Para la aplicación de la Teoría de Mezclas Clásica, el modelo constitutivo se basa en la idea de que el proceso de transferencia de cargas de matriz a refuerzo varía en el momento en que la matriz sufre deformaciones plásticas. El movimiento relativo entre refuerzo y matriz, puede representarse en mecánica de medios continuos a través de una deformación plástica irreparable en el refuerzo.

Tal como se realizó en el trabajo de tesis, la determinación del inicio de este fenómeno para el caso de mortero reforzado con acero, se presentó mediante una condición de resistencia que comparó la tensión efectiva del compuesto.

Dada la forma en que participa el refuerzo dentro del compuesto y el mecanismo de transmisión de tensiones entre refuerzo y matriz, la determinación de su máxima resistencia o resistencia real y su capacidad de colaboración depende de su propia resistencia nominal $(f^N)_{ref}$; o resistencia del refuerzo en condiciones aisladas, de la resistencia nominal de la matriz $(f^N)_{mat}$ y de la resistencia nominal interfase refuerzo-matriz $(f^N)_{ref-matriz}$, o capacidad de transferencia de tensiones desde la matriz al refuerzo.

Se puede así decir que la fibra participa dentro del compuesto en función de su propia resistencia y de la capacidad de transferencia de esfuerzo de la interfaz fibra-matriz, por lo tanto su resistencia está influenciada por el medio que la contiene.

Se define entonces la resistencia del refuerzo contenido en una matriz como:

$$(f^R)_{ref} = \min \left\{ (f^N)_{ref}, (f^N)_{mat}, \left[\frac{2(f^N)_{ref-mat}}{rf} \right] \right\} \quad (2)$$

rf es el radio del refuerzo. La ecuación (2), permite deducir los siguientes casos límite:

- Si la matriz es más resistente que el refuerzo y la adherencia refuerzo-matriz es perfecta, (casi de H-FRP cualitativo), la capacidad de participación del refuerzo queda limitado por su propia resistencia nominal $(f^R)_{ref} = (f^N)_{ref}$.
- Si se produce una falla en la matriz por microfisuras (micrografías), en tanto el FRP se mantiene en régimen lineal, la resistencia del refuerzo queda limitada por la resistencia de la matriz, pues no se transfiere más la tensión que la que permite el medio que la contiene $(f^R)_{ref} = (f^N)_{mat}$

- Si la falla se produce en la interfase refuerzo-matriz, la resistencia del refuerzo queda limitada por la de la interfase $(f^N)_{ref} = 2(f^N)_{ref-mat}/r_f$.

Tal como se observó en las probetas de hormigón reforzadas con barras FRP, y en la mayoría de los materiales compuestos se verifica que el agrietamiento por cortante en la interfase se produce antes que la rotura del refuerzo (situación que se evidenció en las pruebas) y se observa que la separación masiva entre el refuerzo - matriz y por lo tanto la resistencia de la fibra queda limitada por la capacidad de la interfase de transmitir esfuerzos.

La aparición de fenómenos plásticos en la matriz de un material compuesto (mortero-acero) sometido a un estado de cargas monótono creciente, impide la transferencia de los esfuerzos desde la matriz hacia el refuerzo dando lugar a la aparición de deformaciones irreversibles por deslizamiento de la fase de refuerzo respecto a la matriz.

A partir de ese momento de la transferencia de cargas de la matriz al refuerzo no es nula, debido a la presencia de fenómenos de fricción entre ambas fases del material compuesto; de ahí que el refuerzo aumenta su estado tensional según un módulo elástico diferente del inicial.

El modelo de Car-Oller se basa en establecer el estado tensional en el que se encuentra el refuerzo en el momento de producirse la rotura en la matriz del compuesto (39).

La deformación irreversiblemente debida al deslizamiento entre ambas fases se tiene en cuenta en un modelo elasto-plástico con endurecimiento (vigas reforzadas) para la fase de refuerzo debido a la presencia de las fuerzas de rozamiento entre fibra y matriz. Se trata de un modelo NO LOCAL MATERIAL, debido a que el estado de uno de los materiales (refuerzo) depende de otro (matriz).

Con el fin de tener en cuenta la interacción entre matriz y el refuerzo, es necesario determinar el estado tensional de la fase de refuerzo en el momento en que se verifica el deslizamiento relativo entre fibra y matriz debido a la aparición de fenómenos plásticos en esta última.

Este estado tensional es el máximo que se transmite desde la matriz hacia el refuerzo bajo las condiciones de adherencia perfecta entre ambas fases. A partir de ahí las tensiones se transmiten por fricción.

La relación

$$r = \frac{\sigma^n}{f_{\Gamma}^R}$$

incluye el deslizamiento relativo entre fases en la formulación del modelo constitutivos para materiales compuestos.

f_{Γ}^R : Representa la resistencia del refuerzo,

σ^n : tensión en la dirección longitudinal del refuerzo en el momento en que se verifica el deslizamiento relativo entre refuerzo y matriz debido a la aparición de fenómenos plásticos en esta última.

Para simular las deformaciones irreversibles que se verifican como consecuencia del deslizamiento entre refuerzo y matriz es necesario redefinir el criterio de adherencia de la fase correspondiente al refuerzo.

r : permite establecer el momento a partir del cual la matriz no es capaz de transferir carga al refuerzo y simular los fenómenos de fricción entre refuerzo-matriz (este factor se considera constante a partir del cual la matriz se plastifica).

Se hace necesario redefinir el límite de proporcionalidad de las fibras:

$$\phi(\tau; g; \alpha) = F(\sigma; g) - r k(\alpha) = 0$$

r ya está definido, el producto σ_k , redefine el umbral de tensiones del refuerzo a partir del instante en el que se producen fenómenos plásticos en la matriz del compuesto.

La modificación en la condición de fluencia hace necesario redefinir el modelo constitutivo elastoplástico de la fase de refuerzo.

El tema de adherencia ha sido estudiado por varios investigadores con base a los cambios de diferentes propiedades del hormigón en el tiempo (RILEM comité 42 – CEA, 1981) y existe evidencia de que la relación entre la adherencia y la resistencia a compresión correspondiente a edades tempranas puede ser diferente a la supuesta para hormigón a 28 días.

Con base al estudio del modelo anterior teoría desde 1981 y comprobada hoy verifican que este aspecto mejora con el tiempo entre el hormigón y el material de refuerzo. (Chapman y Shabi, 1987).

Un extenso desarrollo experimental se llevó a cabo en Chile en la Universidad Católica; allí se determinó la carga de falla y el deslizamiento relativo acero-hormigón con ensayos especialmente diseñados, donde ambos materiales se sometían a tracción (40).

El fundamento del experimento en 238 especímenes buscaba obtener expresiones de diseño con respecto a la resistencia de la adherencia a temprana edad, para ser utilizadas en modelos de predicción del agrietamiento del hormigón armado y comparar con ecuaciones de las normas BS 8007 (BSI, 1987), BS 8110 (BSI, 1985) y ACI 318, (Virela, 1989).

Entre los ensayos más tradicionales y simples esta el “pull out”. Tanto la American society for testing and materials (1977) como el RILEM/CEB/FIP committee (1970) han desarrollado especificaciones para el “pull out” concéntrico estándar. El objeto es servir sólo como ensayos comparativos para diferentes hormigones y verificar

las características de adherencia de las barras. Aunque estas referencias son antiguas se convierten en información clásica de la investigación; en lo que a técnicas de arrancamiento se refiere.

Para el estudio de la adherencia además de la observación cualitativa se determino que la resistencia media (f^N) es la tensión a la cual se produce la rotura.

Al no evidenciarse deslizamiento del FRP en la matriz, se determino que el ensayo correspondía a barras concéntricas embebidas y continuas en la probeta.

- Sistema de medición de carga 6000lb
- Medición de deslizamiento: estas mediciones se hicieron para morteros reforzados con acero y mortero reforzado con FRP.

Para analizar los resultados la adherencia se calculó a partir de la carga máxima registrada, suponiendo una distribución uniforme de tensiones de adherencia y una longitud de desarrollo igual a la longitud de anclaje. Solo se deben considerar los resultados en que se produjo una falla de adherencia “pull out” de la barra ó “splitting” por arrancamiento del mortero.

Aunque el estudio de la adherencia para vigas de mortero reforzado con FRP, se realizó de manera cualitativa, los valores de carga máxima al momento de fallar los especímenes, permiten reportar valores cuantitativos con base en la teoría estudiada (Leonhardt (1950)) (40).

Tanto el mortero y el refuerzo se sometieron a flexión y tracción; que son en realidad ensayos simples, que permiten una medición precisa de la adherencia entre el mortero – acero y mortero – FRP.

Se sugiere sin embargo más investigación para correlacionar ambos ensayos; aunque para efectos de esta investigación es suficiente.

Se observó que la carga de falla de adherencia aumentó en forma proporcional a la longitud de anclaje, y a la edad del mortero, del diámetro, sección de barra y del recubrimiento.

Es importante tener en cuenta en la resistencia de adherencia, las grandes variaciones de resistencia a la compresión, obtenidas a una edad determinada; ya que las resistencias de adherencia son dependientes de la edad angular, dosificación y curado que la edad por si sola no refleja.

A lo largo de la historia han sido numerosas las investigaciones experimentales desarrolladas con diferentes tipologías de ensayo destacando los trabajos de Coussins (1992), den Uijl (1992) y Abrishami (1993), Vandewalle y Mortelmans (1994) y Mahmoud (1999) (41, 42).

Por otra parte se han detectado algunas deficiencias de adherencia en diferentes tipos de armaduras que justifican la necesidad de estudios adicionales. Los trabajos de Marti (2001), incluyen una excelente recopilación bibliográfica sobre la materia.

Según Al-Dulaijan 1996, Nanni 1997, Bakis 1998, Bank 1998 y Freimanis 1998, el comportamiento referido a la adherencia en barras de FRP depende del diseño, procesos de manufactura y propiedades mecánicas de las mismas como también de las condiciones ambientales. Adicionalmente las fuerzas de adherencia son transferidas de la resina a las fibras de FRP (43).

La fuerza de adherencia de las barras de FRP en el mortero son transferidas por:

- Resistencia de adhesión de la interfase, conocida como química de la adherencia.
- Resistencia friccional de la interfase.
- Trabazón mecánica debido a la irregularidad de la interfase.

Según Faza y Ganga Rao (1990); Ehsani (1996) las propiedades de adherencia de las barras pueden ser extensamente investigadas por diferentes tipos de ensayo, como por ejemplo: ensayos de arrancamiento (30), ensayos de empalme y vigas en voladizo, que permiten determinar una ecuación para encajar las barras de FRP en la matriz de hormigón.

En general, la resistencia de adherencia de las barras de FRP depende de las características de la superficie de la barra, que puede ser corrugada, trenzada, recubrimiento helicoidal, arena cuarzosa o todas las anteriores.

Los esfuerzos de adherencia de las barras de FRP pueden basarse en resultados experimentales dados por el fabricante y descritos en los procedimientos de ensayo.

En la literatura, Benmokrane (1998) propone métodos estándar para la determinación de la adherencia de las barras de FRP con el hormigón. Algunas normas internacionales basan la determinación de las características de adherencia en ensayos de arrancamiento (ASTM 1998). Otras se fundamentan en análisis de deslizamiento, específicamente de armaduras en el extremo de un elemento en el que se produce la transmisión del pretensado RILEM (1979), IRANOR (1982), LCPC (1999) (44).

Estas especificaciones se apoyan en el análisis de la deformación en la superficie del hormigón, y han mostrado algunas dificultades de realización por problemas de estabilidad y dimensiones del ensayo.

Se encuentra en la literatura una situación de vacío normativo que se puso de manifiesto en el Seminario de Diseño y Reforzamiento con materiales compuestos FRP, presentado por la empresa Sika en Enero de 2003 en la ciudad de Medellín (17, 45).

La observación cualitativa en este trabajo, fue la herramienta que se utilizó para estimar el estado interno del refuerzo FRP, la posición, forma, recubrimiento y superficie de contacto entre el material de refuerzo y el mortero.

Tanto en la fabricación como en el servicio de los diferentes elementos estructurales de hormigón armado, la propiedad más importante que se debe garantizar es la posición y adherencia del refuerzo embebido en la matriz cementante.

Otra ventaja de los FRP embebidos en el mortero, es la resistencia a la corrosión. En la Figura 31 se observa la presencia de óxidos en la superficie del mortero, creando una capa de aislamiento, favoreciendo el desprendimiento del mismo y generando un plano de falla continuo, que al momento de aplicar la carga se desliza en el interior del mortero y hace colapsar la estructura.

Figura 31. Presencia de óxido en la superficie del mortero



La situación planteada en el párrafo anterior no es posible que ocurra en morteros y hormigones reforzados internamente con las barras de FRP; pues sus características poliméricas no permiten la corrosión de las barras de refuerzo.

La adherencia entre el refuerzo y la matriz cementante debe ser garantizada desde el análisis y diseño de los elementos estructurales; pues el modo de falla debe ser definido y debe ocurrir por cualquier otro aspecto menos por el desprendimiento del recubrimiento en el material utilizado como refuerzo

En la ingeniería civil la determinación cualitativa de la adherencia se realiza mediante la observación de la presencia de fisuras en la superficie de contacto entre el refuerzo y la matriz cementante; mediante métodos directos que permiten concluir que tan grave o no es la presencia de las mismas en los elementos estructurales una vez ha endurecido el hormigón.

7 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se elaboraron 36 probetas de mortero con arena de Ottawa normalizada y arena de Canteras de Colombia (convencional) en una proporción 1:2,75 de cemento-arena sin refuerzo, con refuerzo de acero y barras de polímeros reforzados con fibras FRP. Las probetas de mortero correspondían a vigas simples y reforzadas según las recomendaciones de las Normas Técnicas Colombianas de la Construcción NTC-110- 120-220 (46).

Los modelos de vigas a escala reducida se sometieron a la Prensa de 100 T (Tinius Olsen), falladas a 7 y 28 días y observadas en el Microscopio Estereoscopio LEICA y en el Microscopio Electrónico de Barrido JOEL de la Universidad Nacional, Sede Medellín .

Las fases presentes en los morteros reforzados con FRP normalizados (arena de Ottawa) y morteros convencionales (arena de Canteras de Colombia); con el fin de examinar de manera cualitativa y cuantitativa la Adherencia entre el material FRP de refuerzo, el acero y la matriz cementante.

El número de especímenes se determinó con base a un diseño de experimentos, específicamente el método 2^k (47). Por este método quedaba garantizado que el número de probetas para la evaluación de la resistencia a la flexión y la adherencia de manera cualitativa y cuantitativa era suficiente.

Por lo costoso y escaso del material FRP se tomó la decisión de elaborar especímenes de dimensiones iguales a las que sugiere las Normas Técnicas de la Construcción NTC específicamente la norma NTC-120 (46), y luego se decidió elaborar con un material FRP Durglass, probetas donde la relación de áreas de

refuerzo y sección fueran consistentes con las vigas que requerían mayor sección transversal por las características del refuerzo FRP Arapree.

Esta alternativa de estimar el número de especímenes para examinar algunas de las propiedades mecánicas y adherencia de los FRP, embebidos en una matriz de mortero; además de lo escaso del material para las pruebas y los altos costos para su consecución, permite garantizar con absoluta certeza, que las pruebas preparadas en el Laboratorio de Estructuras; examinadas allí, y observadas en los Laboratorios de Metalografía y Microscopia Avanzada de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, son suficientemente representativas para los fines del estudio (38, 47).

Además de llevar las muestras al microscopio estereoscópico y al microscopio electrónico de barrido después de la falla, para la evaluación de la adherencia, se prepararon seis (6) con características definidas que están en las figuras 26, 27, 28 y 29. Se les regó tinta china en los extremos de las mismas para observar la penetración de la tinta en el interior de las probetas y obtener una evaluación cualitativa de la adherencia; después de haberlas fallado a la edad de siete (7) días, en la Prensa Universal en la escala de tres (3) toneladas del Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional como se observa en las figuras 30, 31, 32 y 33.

7.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Se elaboraron especímenes de mortero armado con arena de Ottawa y arena convencional (Canteras de Colombia), según las normas NTC-110, 112 y 120 (46), para las pruebas de resistencia a la flexión, que fueron falladas a las edades de siete y veintiocho días.

En la Figura 32, se puede observar las características de las probetas y los materiales utilizados.

**Figura 32. Implementos para las pruebas y elaboración de especímenes
Laboratorio de Estructuras**



Para la elaboración de las vigas que se probaron a flexión se utilizaron las formaletas y el procedimiento para determinar la resistencia del cemento Pórtland según la norma NTC-120. (46).

De la Figura 33 a la Figura 36 se muestra el cálculo, peso de materiales, mezcla y llenado de moldes para la elaboración de vigas de morteros normalizados con arena de Ottawa y arena común.

Figura 33. Cálculo de Materiales



Figura 34. Peso de Materiales



Figura 35. Mezcla de los Materiales



Figura 36. Llenado de moldes



Para la elaboración de las probetas con acero de refuerzo convencional, se siguió el mismo procedimiento que para las de reforzadas con los nuevos materiales FRP. Las fotos a continuación presentan una secuencia del procedimiento especificado.

Figura 37. Compactación y colocación de refuerzo



Figura 38. Ubicación del refuerzo Durglass y Arapré

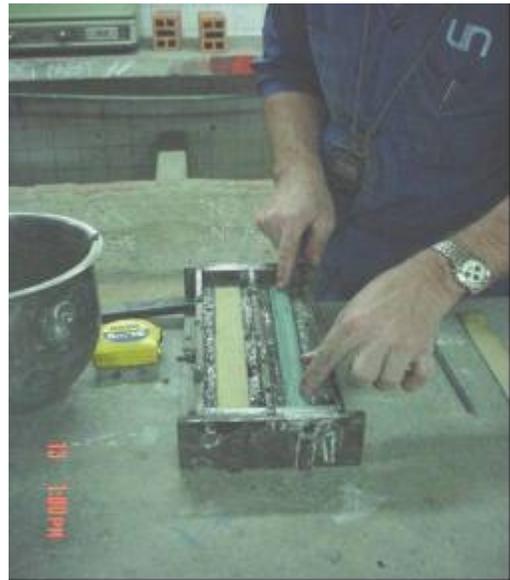


Figura 39. Verificación de la posición del refuerzo

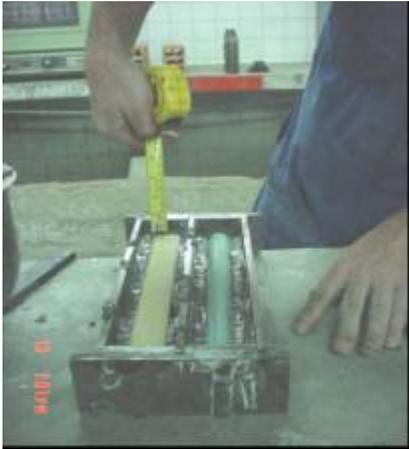


Figura 40. Probetas con acero y con los nuevos materiales



Fue necesario fijar el refuerzo en los extremos de las formaletas, esto debido al bajo peso de las barras de FRP, que tienden a flotar en las mezclas de mortero fresco durante el vaciado. Una vez elaboradas las probetas se pesaron y fueron llevadas al tanque de curado, para ser falladas a los siete y veintiocho días.

El procedimiento de carga para provocar la falla a flexión y el estado de las probetas falladas se muestran a continuación.

Figura 41. Ensayo a flexión NTC 120



Figura 42. Aplicación de carga



Figura 43. Falla de la probeta y grieta proyectada.



Figura 44. Aspecto de la probeta fallada y desmontada



En la Figura 45 están las vigas reforzadas con acero convencional elaboradas con arena de Ottawa (arena normalizada) y Canteras de Colombia (normal).

Figura 45. Probetas reforzadas con acero



Para la elaboración de las probetas que se llevaron a la prensa universal de tres toneladas para la evaluación cuantitativa de la adherencia, se diseñó un tipo de

espécimen como se observa en la Figura 46, con el fin de fijar las mordazas en la prensa.

Las probetas de la Figura 46 a

Figura 52 se elaboraron con el objeto de determinar de manera cuantitativa la adherencia entre un mortero con una relación agua-cemento (A/C) de 0.5 y las barras de FRP.

Figura 46. Probeta con tinta china en los extremos.



Figura 47. Probeta ubicándose en el dispositivo



Figura 48. Probetas fijadas a las mordazas en la prensa de 3 T



Las dimensiones de las probetas para la prueba cuantitativa de la adherencia tenían dimensiones según la especificación NTC-220; pero al momento de fijarlas a las mordazas de la prensa universal, fue necesario recortar uno de los extremos en aproximadamente un centímetro y medio. Quedó un extremo de la probeta (Mortero FRP) con una longitud de 8cm y sección 5X5 cm²; el otro extremo quedo de una longitud de 6.5cm y una sección de 5x5 cm².

Figura 49. Probeta en la prensa universal.



Figura 50. Lectura de carga en la escala de 3 T



Figura 51. Probetas después de la falla



7.1.1 VIGAS CON ARENA DE OTTAWA REFORZADAS CON ACERO CORRUGADO

Refuerzo : Varilla de acero corrugado de $d = 4.49 \text{ mm}$

Longitud de 140 mm

Luz libre entre apoyos : 14.0 cm

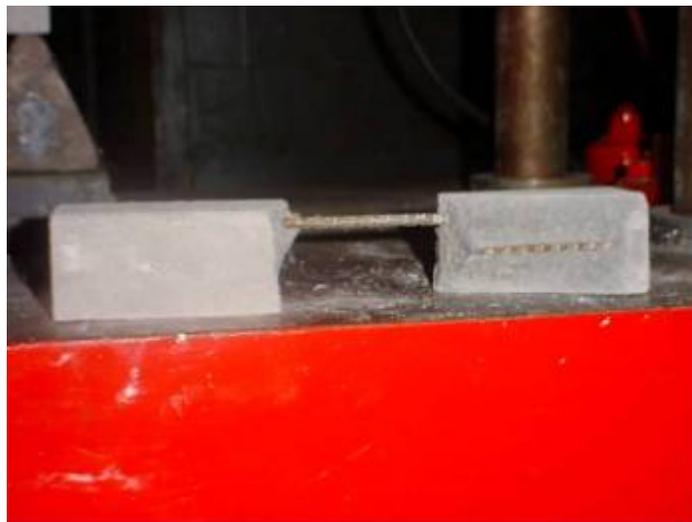
Ancho de la viga : 4.0 cm

Espesor de la viga : 4.0 cm

Diseño del Mortero : $A/C = 0.60$

Proporción (cto/arena) : 1 : 2.75

Figura 52. Falla de probeta con acero corrugado



7.1.2 VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON BARRAS DE FRP DE SECCIÓN CIRCULAR

Refuerzo : Fibra polimérica de sección circular de $d=4,49$ mm

: Longitud de 140 mm

Luz libre entre apoyos : 14,0 cm

Ancho de la viga : 4,0 cm

Espesor de la viga : 4,0 cm

Diseño del Mortero : $A/C = 0,60$

Proporción (cto/arena) : 1 : 2,75

7.1.3 VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON BARRAS DE FRP DE SECCIÓN CIRCULAR

Refuerzo : Fibra polimérica de sección circular de $d=9.44$ mm

: Longitud de 140 mm

Luz libre entre apoyos : 14.0 cm

Ancho de la viga : 4.0 cm

Espesor de la viga : 4.0 cm

Diseño del Mortero : $A/C = 0.60$

Proporción (cto/arena) : 1 : 2.75

Figura 53. Probetas reforzadas con fibra polimérica de sección circular y diámetro de 9.44 mm



7.1.4 VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON BARRAS DE FRP DE SECCIÓN CIRCULAR

En la Figura 54 está la probeta construida con mortero de arena normal, reforzada con fibra polimérica de sección circular con diámetro de 21.86 mm.

Figura 54. Probetas reforzadas con fibra polimérica de sección circular y diámetro de 21.86 mm



Refuerzo : Fibra polimérica se sección circular de $d = 21.86 \text{ mm}$
Longitud de 260 mm

Luz libre entre apoyos : 23.5 cm

Ancho de la viga : 5.0 cm

Espesor de la viga : 5.0 cm

Diseño del Mortero : A/C = 0.60

Proporción (cto/arena) : 1 : 2.75

7.1.5 VIGAS CON ARENA NORMAL REFORZADAS CON FIBRA POLIMÉRICA PLANA

En la Figura 55 se puede apreciar la probeta con arena normal reforzada con fibra polimérica plana de espesor 5.0 mm y ancho de 29.0 mm.

Figura 55. Probetas reforzadas con fibra polimérica de sección plana



Refuerzo : Fibra polimérica plana de espesor $e=5.0$ mm
Ancho de 29 mm y Longitud de 260 mm

Luz libre entre apoyos : 23.5 cm

Ancho de la viga : 5.0 cm

Espesor de la viga : 5.0 cm

Diseño del Mortero : $A/C = 0.60$

Proporción (cto/arena) : 1 : 2.75

7.2 ENSAYO A FLEXIÓN EN VIGAS RECTANGULARES DE MORTERO REFORZADAS CON ACERO Y BARRAS DE FRP

Con la prensa Tinius Olsen de capacidad 100 T se fallaron a flexión las probetas, aplicando una carga en el centro de la luz entre los dos apoyos de las vigas de mortero con acero convencional y con las barras de FRP según la norma NTC-120 (46).

Las probetas ensayadas se llevaron hasta la falla obteniendo el valor de carga máxima. Este valor también se utilizó para cuantificar la adherencia de los

morteros reforzados; como también para obtener los valores de momento flector y módulo de rotura para cada una de las vigas rectangulares de mortero simple y reforzado. Los resultados obtenidos aparecen en el capítulo 8 de este trabajo.

7.3 DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA EN EL MORTERO REFORZADO

Para la determinación de la adherencia entre el mortero y el nuevo material de refuerzo se utilizaron las probetas falladas a flexión para ser cortadas en fracciones más pequeñas, con el objeto de poder ser llevadas al Microscopio Electrónico de Barrido (JOEL) y al Microscopio Estereoscópico (LEICA) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Las pequeñas fracciones de mortero reforzado con FRP y acero, en ambos microscopios se evaluó de manera cualitativa; especificando características de adherencia y desprendimiento del material cementante antes y después de la falla de los diferentes tipos de refuerzo. Las técnicas de arrancamiento empleadas en el desarrollo de la tesis proporcionaron valores cuantitativos en lo que a la adherencia del mortero y el refuerzo se refiere.

El material de refuerzo FRP tiene un recubrimiento de arena cuarzosa, con el objeto de mejorar la adherencia y evitar el deslizamiento entre el refuerzo y la matriz cementante, una vez se han combinado los materiales.

La presentación de las barras de FRP que se utilizan como refuerzo interno en matrices de hormigón pueden tener algún tipo de corrugado combinado ya sea con arena cuarzosa o chorros de arena, situación que dependerá, del uso y funcionalidad del elemento estructural que se halla planteado en el análisis y diseño.

8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del trabajo experimental realizado en esta investigación.

Se determinó la resistencia a la flexión de vigas rectangulares de mortero simple y mortero reforzado con acero corrugado y con barras de FRP; y la observación cualitativa y los valores cuantitativos de la adherencia de las barras utilizadas como refuerzo, embebidas en la matriz cementante.

Se determinó inicialmente la resistencia a la flexión a los siete y veintiocho días; comparando los resultados de estas vigas reforzadas con vigas “patrón”; es decir, vigas de mortero sin refuerzo.

8.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGAS DE MORTERO SIMPLE

Tabla 14. Vigas Patrón Con Arena De Ottawa

MUESTRA	EDAD (DIAS)	RESISTENCIA Kgf	MOMENTO Kgf*cm	MODULO DE ROTURA Kgf/cm ²
1	7	175	612,5	57,4
2	7	175	612,5	57,4
3	28	227	794,5	74,5
4	28	227	794,5	74,5

Longitud de viga : 160 mm

Sección transversal: 40 mm * 40 mm

Luz entre apoyos : 140 mm.

8.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGAS DE MORTERO REFORZADO

Los morteros de vigas de mortero simple y reforzado se sometieron a flexión según la especificación NTC-120 (46). En las siguientes tablas se encuentran los resultados de la resistencia a la flexión de vigas de hormigón con arena Ottawa y Canteras de Colombia, y reforzadas con acero convencional y FRP.

Tabla 15. Vigas con arena de ottawa, reforzadas con acero de refuerzo corrugado de diámetro de 4,49 mm

Longitud de viga : 160 mm

Sección transversal: 40 mm * 40 mm

Luz entre apoyos : Para las muestras 1 y 2 es de 140 mm

Para las muestras 3 y 4 es de 120 mm

MUESTRA	EDAD (DIAS)	RESISTENCIA Kgf	MOMENTO Kgf*cm	MODULO DE ROTURA Kgf/cm ²
1	7	295,5	1034	97,0
2	7	286,0	1001	94,0
3	28	443,0	1329	124,6
4	28	432,0	1296	121,5

Tabla 16. Vigas con arena normal, reforzadas con acero de refuerzo corrugado de diámetro de 4,49 mm

Longitud de viga : 140 mm

Sección transversal: 40 mm * 40 mm

Luz entre apoyos : Para las muestras 1 y 2 es de 140 mm

Para las muestras 3 y 4 es de 120 mm.

MUESTRA	EDAD (DIAS)	RESISTENCIA Kgf	MOMENTO Kgf*cm	MODULO DE ROTURA Kgf/cm2
1	7	291,0	1019	95,5
2	7	318,0	1113	104,0
3	28	432,0	1296	121,5
4	28	422,7	11268	119,0

Tabla 17. Vigas con arena normal, reforzadas con barras de frp de sección circular y diámetro de 9.44 mm

Longitud de viga : 140 mm

Sección transversal: 27 mm * 27 mm

Luz entre apoyos : Para las muestras 1 y 2 es de 140 mm

Para las muestras 3 y 4 es de 120 mm

MUESTRA	EDAD (DIAS)	RESISTENCIA Kgf	MOMENTO Kgf*cm	MODULO DE ROTURA Kgf/cm2
1	7	147,5	516,3	157,4
2	7	142,5	498,8	152,0
3	28	215,5	646,5	197,1
4	28	212,5	637,5	194,3

Tabla 18. Vigas con arena normal, reforzadas con FRP plano de espesor (e=5,0mm), ancho (b=29,0mm) y longitud (l=260,0 mm)

Longitud de viga : 285 mm

Sección transversal: 50 mm * 50 mm

Luz entre apoyos : 240 mm

MUESTRA	EDAD (DIAS)	RESISTENCIA Kgf	MOMENTO Kgf*cm	MODULO DE ROTURA Kgf/cm2
1	7	329,5	1977	95,0
2	7	329,5	1977	95,0
3	28	591,0	3546	170,0
4	28	511,0	3066	147,0

Tabla 19. Vigas con arena normal, reforzadas con barras de frp, sección circular y diámetro de 21, 86 mm

Longitud de viga : 285 mm

Sección transversal: 50 mm * 50 mm

Luz entre apoyos : 240 mm

MUESTRA	EDAD (DIAS)	RESISTENCIA Kgf	MOMENTO Kgf*cm	MODULO DE ROTURA Kgf/cm2
1	7	636	3816	183,0
2	7	636	3816	183,0
3	28	682	4092	196,0
4	28	670	4020	147,0

A continuación se presentan gráficamente una recopilación de los datos de la Tabla 14 a la Tabla 19 para observar el comportamiento de la resistencia, del momento flector y del módulo de rotura de las vigas rectangulares de mortero simple y reforzadas con barras de acero y FRP

CARGA MÁXIMA (Kgf)

	TABLA 16	TABLA 17	TABLA 18	TABLA 19	TABLA 20	TABLA 21
EDAD	OTTAWA SIN REFUERZO	OTTAWA CON REFUERZO	NORMAL CON ACERO	NORMAL CON FRP CIRCULAR DE 9,44 mm DE DIÁMETRO	NORMAL CON FRP PLANO	NORMAL CON FRP CIRCULAR DE 21,86 mm DE DIÁMETRO
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	175,0	290,8	304,5	145,0	329,5	636,0
28	227,0	437,5	427,4	214,0	551,0	676,0

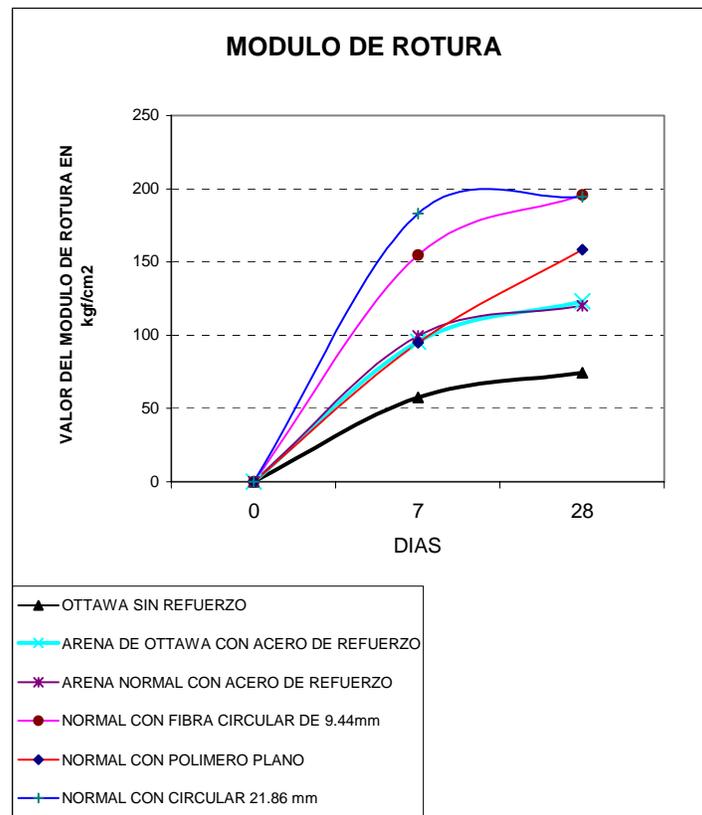
MOMENTO FLECTOR (Kg*cm)

	TABLA 16	TABLA 17	TABLA 18	TABLA 19	TABLA 20	TABLA 21
EDAD	OTTAWA SIN REFUERZO	OTTAWA CON REFUERZO	NORMAL CON ACERO	NORMAL CON FRP CIRCULAR DE 9,44 mm DE DIÁMETRO	NORMAL CON FRP PLANO	NORMAL CON FRP CIRCULAR DE 21,86 mm DE DIÁMETRO
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	612,5	1017,5	10,7	505,5	19,8	38,2
28	794,0	1312,5	12,8	642,0	33,1	40,6

MODULO DE ROTURA (Kg/cm2)

	TABLA 16	TABLA 17	TABLA 18	TABLA 19	TABLA 20	TABLA 21
EDAD	OTTAWA SIN REFUERZO	OTTAWA CON REFUERZO	NORMAL CON ACERO	NORMAL CON FRP CIRCULAR DE 9,44 mm DE DIÁMETRO	NORMAL CON FRP PLANO	NORMAL CON FRP CIRCULAR DE 21,86 mm DE DIÁMETRO
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	57,4	95,5	99,8	154,7	95,0	183,0
28	74,5	123,0	120,3	195,7	158,5	194,5

Figura 56. Resumen de los resultados de Módulo de Rotura en vigas rectangulares falladas a flexión



En la Figura 57, y la Figura 58 se pueden observar las vigas después de la falla a flexión. Estas vigas falladas se sometieron al proceso de arrancamiento; que consistió en desprender manualmente el hormigón endurecido de los elementos de refuerzo una vez se habían fallado las vigas, para observar cualitativamente la apariencia del material cementante y el material de refuerzo.

Figura 57. Falla de la probeta con refuerzo plano



Figura 58. Falla de probeta reforzada con FRP de diámetro de 21.86 mm



8.3 ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LA ADHERENCIA EN EL MORTERO REFORZADO

A continuación se presentan las micrografías y fotos correspondientes a secciones de mortero reforzadas finamente cortadas y sometidas a observación en el microscopio electrónico de barrido y el microscopio estereoscópico.

En las micrografías 5 y 6 tomadas de pastas de cemento se pueden observar a un día y siete días de ser falladas las fases presentes, como es la Ettringita y la Portlandita con muy buena resolución.

A un día de falla la fase de Ettringita se aprecia con mayor claridad alrededor de los silicatos hidratados de calcio. Situación que solo se pudo lograr en las micrografías tomadas en los poros de las mismas pastas falladas a los siete días, y en las fisuras dejadas por la misma.

Después de veintiocho días los mismos especímenes se observaron en el microscopio y aún seguían presentes en los poros (zonas más oscuras en micrografía) las agujas correspondientes a la fase Ettringita y los hexágonos correspondientes a la fase Portlandita con gran claridad.

Figura 59. MICROGRAFÍA 5 Pasta de cemento a un día de falla

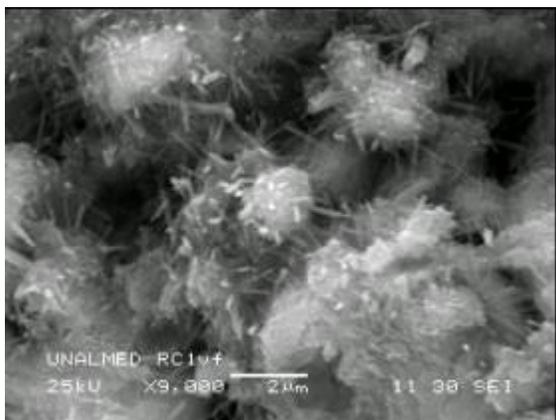
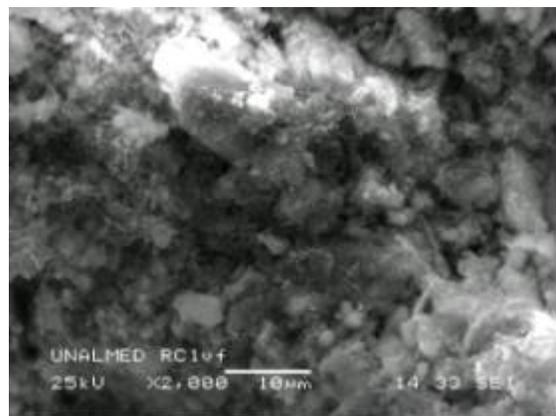
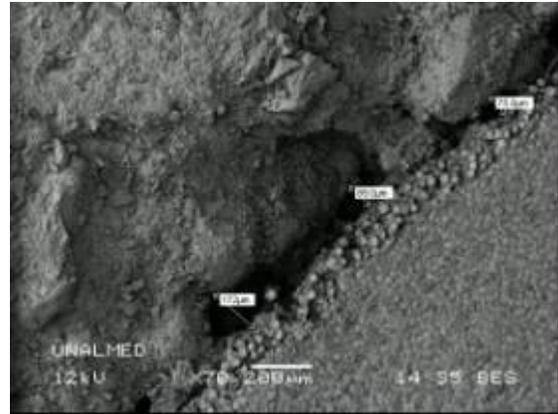
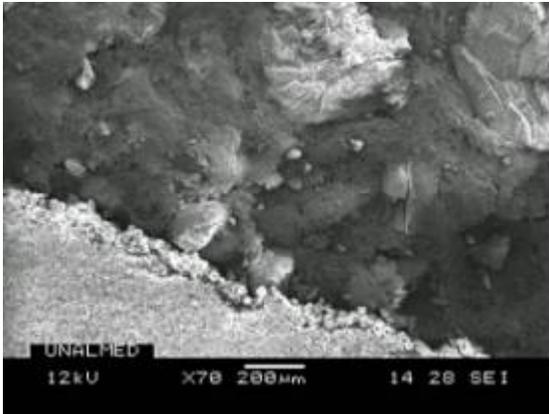


Figura 60. MICROGRAFÍA 6 Pasta de cemento a siete días de falla



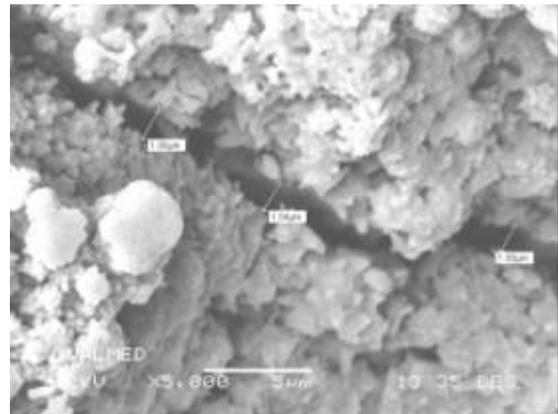
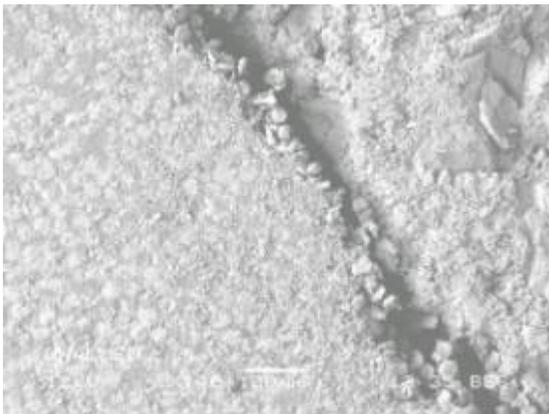
En las micrografías 7 y 8, se observa la distribución de las fibras embebidas en el refuerzo de FRP y los espacios señalados entre el refuerzo y el mortero que son micrométricos (200 micras).

Figura 61. MICROGRAFÍAS 7 y 8 Separación entre el FRP y el mortero



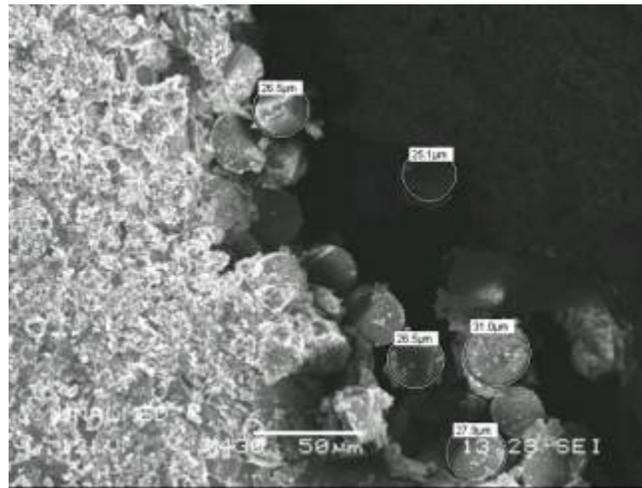
Las fisuras y espacios entre las fibras componentes del FRP y entre el refuerzo y la matriz de mortero pueden observarse en las micrografías 9 y 10.

Figura 62. MICROGRAFÍAS 9 y 10 . Separación FRP y mortero



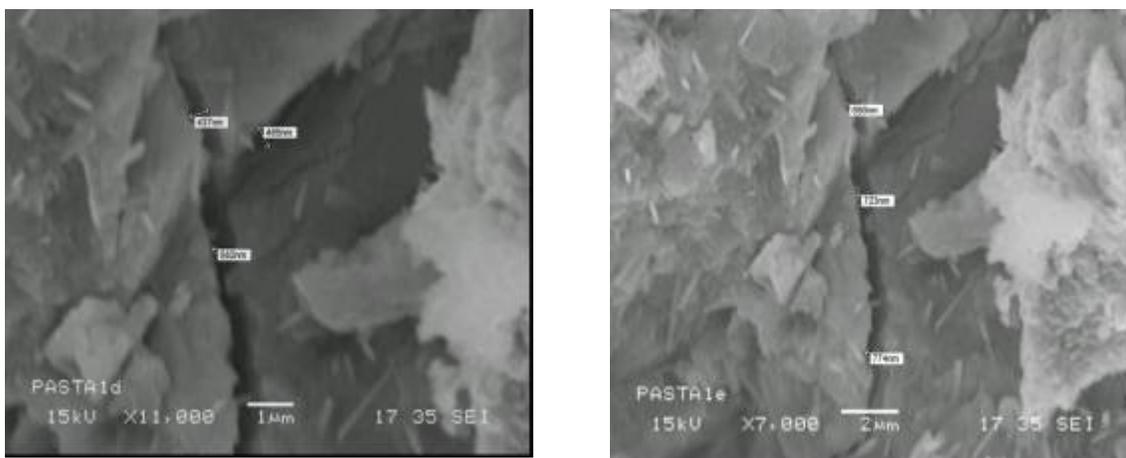
Es muy importante que la probeta esté bien pulida y tenga un buen recubrimiento (oro o carbono), de lo contrario se puede distorsionar la observación microscópica.

Figura 63. MICROGRAFÍA 11. Diámetro de fibras en el FRP.



En la Referencia 38 en lo que al análisis de pastas de cemento (principal constituyente de la matriz de hormigón) se refiere, se hace la observación a los espacios vacíos; ya que permiten la formación de cristales, generando planos potenciales de falla en los compuestos de mortero, como se observa en la micrografía 12 y 13.

Figura 64. MICROGRAFIA 12 y 13. Cristales y fisuras en morteros



Por las fisuras se pueden originar fallas microscópicas que más adelante pueden generar grandes planos potenciales de falla. Para el caso del mortero reforzado con acero convencional lo anterior se convierte en una preocupación, en cuanto a

la durabilidad de la estructura; pero para el caso de morteros reforzados con FRP, se puede obviar, pues no habrá corrosión y deterioro del mortero y el hormigón.

Desde la Figura 65 a la Figura 67 se aprecia como después de la falla las fibras del FRP son arrancadas de la matriz polimérica y quedan adheridas al mortero.

Lo anterior de alguna manera garantiza que la arena cuarzosa suple de igual manera la superficie corrugada de un acero convencional; evitando a la vez deslizamiento del refuerzo en el interior de los elementos de mortero.

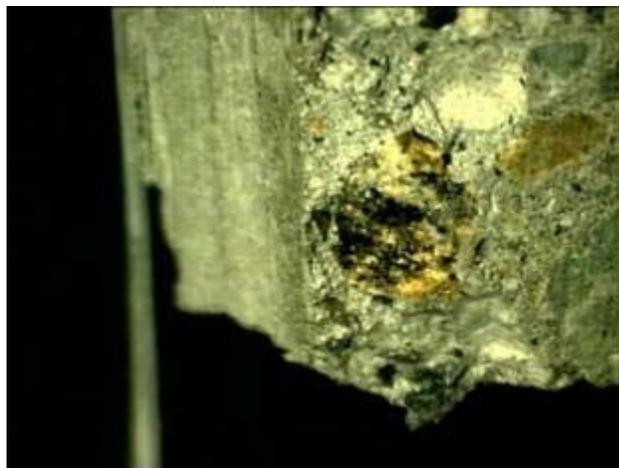
Figura 65. Mortero adherido al FRP (Durglass)



Figura 66. Desprendimiento de la fibra



Figura 67. Fibra adherida a la matriz cementante



En la Figura 65, se pueden apreciar algunos espacios en el FRP no recubiertos con el mortero. Esto pudo ser ocasionado por una deficiente compactación en el proceso de elaboración de las probetas no eliminando todo el aire o espacio entre el mortero y el FRP.

Otra razón que pudo originar estas superficies no recubiertas es el hecho, que en el momento de buscar la posición correcta del FRP en las probetas, se realizó algún tipo de levantamiento del FRP sobre el mortero fresco generando una discontinuidad en el contacto.

En las siguientes figuras se pueden ver las características del hormigón reforzado con acero convencional, después de la falla. También se puede apreciar la corrosión en el acero y en el mortero, situación ausente en la superficie de contacto y material del mortero reforzado con FRP.

Vale la pena indicar de nuevo que el acero de refuerzo al momento de la falla se deslizó en la matriz cementante de mortero, situación que no ocurrió con las barras de FRP; además de que salía limpio el acero de refuerzo, es decir, sin ningún tipo de recubrimiento en la superficie.

Figura 68. Acero descubierto y corroído



Figura 69. Superficie del mortero dejada por el refuerzo



Figura 70. Superficie de FRP cubierta con mortero



Figura 71. FRP embebido en la matriz de mortero



Para el caso de las vigas reforzadas con acero, el recubrimiento no era tan bueno como si lo fue para las vigas reforzadas con barras de FRP. Esto garantiza la compatibilidad entre la matriz cementante de hormigón y el nuevo material de refuerzo.

Este estudio realizado en vigas rectangulares reforzadas con FRP, es una contribución más a la tarea investigativa de otros autores (referencias dadas en el desarrollo del trabajo); pero la aplicación a elementos en escala natural no se ha efectuado para el reforzamiento de estructuras, sino para la rehabilitación, repotenciación en Colombia.

Esta situación se debe a los altos costos (Anejo 1) de los materiales y al escepticismo en algunas culturas de incluir nuevas técnicas de construcción que no tiene una industria establecida.

8.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y LA ADHERENCIA EN VIGAS DE MORTERO SIMPLE Y REFORZADO

En numerales a continuación se presenta un análisis de los resultados de carga máxima, momento flector y módulo de rotura en vigas rectangulares de mortero simple y reforzado con barras de acero convencional y barras de FRP.

Se presenta además el análisis comparativo, cualitativo y cuantitativo de la adherencia entre el refuerzo y la matriz cementante de mortero.

8.4.1 ANÁLISIS CARGA MÁXIMA EN Kgf

Comparando las resistencias de las vigas de mortero sin refuerzo con las reforzadas; se puede observar un incremento de resistencia tanto en las vigas reforzadas con acero como las reforzadas con barras de FRP, comparados con las vigas “patrón” sin refuerzo.

En las vigas rectangulares reforzadas con barras circulares de diámetro de 9.44 mm, se observa una menor resistencia comparada con las vigas sin refuerzo, pero con un comportamiento similar, esto debido, a que a las vigas reforzadas con barras circular de diámetro de 9.44 mm se les disminuyó la sección transversal estableciendo una compatibilidad entre la sección transversal del refuerzo y el mortero igual a la existente entre las vigas normalizadas reforzadas con FRP de diámetro 21,86 mm.

Las vigas rectangulares elaboradas con arena de Ottawa y arena normal reforzadas con barras de acero el comportamiento fué similar, lo que permite concluir que la arena no influye en el aporte de resistencia para estas vigas y que efectivamente las variaciones de resistencia en los resultados corresponde al aporte del refuerzo.

El aporte de resistencia del refuerzo plano es significativo debido a que tiene una distribución más uniforme en la matriz cementante lo cual permite obtener un compuesto más homogéneo donde las contribuciones de tensiones internas se distribuyen mejor.

La resistencia mayor se obtuvo en vigas reforzadas con barras de mayor sección; de hecho al observar las probetas después de la falla el refuerzo circular de diámetro de 21.86 mm, permanecía intacto y el mortero se había agrietado hasta provocar la falla.

8.4.2 ANÁLISIS DEL MOMENTO FLECTOR EN Kgf.cm

Observando los resultados obtenidos para momento flector de las vigas de mortero con o sin refuerzo; se aprecia un comportamiento igual al que se presenta en los resultados de carga máxima.

Esta igualdad de comportamientos en los resultados se debe a que el momento flector es directamente proporcional a la resistencia pues para determinar el momento flector, solo se afecta la resistencia por un factor de L/4, siendo L la longitud libre entre los apoyos. Así la fórmula para el cálculo del momento flector es :

$$M = \frac{P.L}{4}$$

Donde:

P : Carga Máxima

L : Luz entre apoyos

En las vigas rectangulares reforzadas con barras circulares de diámetro de 9.44 mm., se observa que la disminución de sección no afecta el momento flector significando que su variación depende solo de la luz entre apoyos.

Con los datos de carga máxima se puede predecir el comportamiento a flexión en vigas de mortero donde la luz entre apoyos es constante.

El valor del momento flector es significativo en las vigas fabricadas con el refuerzo plano, debido a su distribución uniforme en la matriz cementante, como lo muestran los resultados de resistencia a la falla.

8.4.3 ANÁLISIS DE LA FIGURA 52 (MÓDULO DE ROTURA EN Kgf/cm^2)

En la viga rectangular de mortero simple se aprecia un comportamiento normal del Módulo de Rotura. Las curvas correspondientes a las vigas reforzadas con acero, elaboradas con arena de Ottawa y normal son muy similares, lo que permite concluir que la arena no es un material que afecte el Módulo de Rotura en vigas rectangulares de mortero.

A la edad de siete días, las vigas elaboradas con arena de Ottawa y con acero de refuerzo presentan valores del Módulo de Rotura muy similares a los obtenidos en vigas de mortero con arena normal y reforzadas con barras de FRP planas.

El comportamiento de la viga reforzada con el polímero plano tiene un mayor Módulo de Rotura que las reforzadas con acero.

Es importante observar que el menor valor de carga máxima se obtuvo para las vigas de mortero reforzadas con las barras de diámetro 9.44mm, y por tanto los valores del momento flector eran menores. El Módulo de Rotura para estas vigas son mayores, debido a la influencia de la geometría de la sección en este cálculo.

8.4.4 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA ADHERENCIA ENTRE EL MORTERO Y EL REFUERZO.

Una vez falladas las probetas a flexión en la prensa de 100T (TINIUS OLSEN), fueron llevadas para ser observadas en el Microscopio Electrónico de Barrido (JOEL) y el Microscopio Estereoscópico (LEICA). La adherencia entre el mortero y el material utilizado como refuerzo arrojó las siguientes observaciones que permiten concluir que la adherencia entre el mortero y las barras de FRP es excelente:

1. La técnica de arrancamiento aplicada a las probetas falladas a flexión, permitió observar que el acero se desprende con facilidad del mortero, quedando limpio y permitiendo a edades tempranas su reutilización.
2. En el análisis cualitativo correspondiente a la figura 60, del desprendimiento del mortero del acero, se puede observar con mucha claridad, el espacio dejado por el refuerzo de acero sin originar arrancamiento del mortero en la matriz cementante.
3. En la misma figura 60 se evidencia la presencia de óxido en la superficie de mortero dejada por el refuerzo de acero. EL óxido es uno de los factores determinantes en la adherencia adecuada entre el mortero y el refuerzo, pues afecta desfavorablemente la durabilidad del compuesto.
4. En el caso del refuerzo FRP plano, se observa en la figura 57, el desprendimiento de fibras al aplicar la técnica de arrancamiento (30), sugerida en la mayoría de los artículos que tratan el tema de la adherencia; donde se desprenden más fácilmente las fibras en el interior del polímero que el mortero alrededor del refuerzo FRP.

5. En las figuras 22, 23 y 24 se puede observar una mejor adherencia entre el mortero y las barras de FRP, que entre el mortero y el acero; pues el refuerzo del FRP quedaba recubierto de mortero mientras que el acero se retiraba sin dificultad de la cavidad dejada por el mismo una vez endurecía el mortero. También se aprecia como las barras de FRP quedan embebidas en la matriz cementante sin presencia de fisuras alrededor el refuerzo.
6. La superficie de mortero no evidencia presencia de óxido, situación que era de esperarse por las características físico-químicas de las barras de FRP.
7. Las barras de acero convencional tienen normalmente una superficie corrugada con el fin de mejorar la adherencia con el mortero. En el caso de las barras de FRP, la superficie de las mismas tienen un baño de arena cuarzosa y en otros casos de chorros de arena; y también pueden estar corrugadas, situación que se determina por el diseñador según la funcionalidad de la estructura.
8. La adherencia del FRP con el mortero es muy buena; pues la falla queda garantizada por el aplastamiento del mortero u otro aspecto, excepto por el desprendimiento del refuerzo FRP de la matriz cementante.
9. En las probetas de mortero reforzadas con barras de FRP una vez falladas, siempre se evidenció el aplastamiento del mortero mientras el refuerzo FRP quedaba embebido en la matriz sin presentar una vez retirado ningún tipo de deformación aparente.
10. En la ingeniería civil, estas observaciones se hacen a nivel macro en la estructura, pues técnicas microscópicas no son comunes para la evaluación del comportamiento del mortero reforzado; aunque se convierten en una herramienta fundamental para el entendimiento del comportamiento del mismo, que facilita optimizar materiales, análisis y diseños.

11. En el Microscopio Electrónico de Barrido, se pudieron identificar algunas de las fases más importantes que ocurren en el interior del mortero cuya comparación se realizó con las micrografías 12 y 13, y que están relacionadas con la adherencia interna del mismo; es decir, con la presencia de poros que facilita planos potenciales de falla, a través de los cuales los agentes externos pueden llegar hasta el refuerzo, facilitando la corrosión del mortero.
12. Estudiar como los espacios entre las fases de la pasta de cemento (Ettringita, Portlandita) pueden evitarse para dar mayor compacidad al mortero y se sugiere para otra investigación; igualmente evaluar la posibilidad de recuperar el refuerzo de FRP una vez se ha demolido o fallado el hormigón reforzado, pues según las observaciones realizadas mecánicamente no se alteran, pero físicamente quedan cubiertas por el mortero de recubrimiento.
13. Por lo expuesto en el numeral anterior al momento de diseñar y proyectar estructuras reforzadas con barras de FRP se recomienda utilizar hormigones de alta resistencia; para aprovechar al máximo las propiedades mecánicas que otorgan la combinación de estos materiales.
14. La técnica empleada para la fabricación de las probetas fue fácil con estos nuevos materiales, pero se sugiere la fijación de las barras de FRP en los extremos de las formaletas para garantizar que no se desplacen y floten durante el vaciado del mortero por lo liviano de las mismas.
15. En conclusión el análisis cualitativo de la adherencia del mortero con las barras de FRP, permite garantizar su buen comportamiento y uso como otra alternativa de reforzamiento interno de elementos estructurales de hormigón armado en Colombia.

16. La buena interpretación de las micrografías y fotografías puede permitir al diseñador conociendo la mezcla de hormigón, optimizar la adición de otros compuestos que retrase la reacción química de una de las fases y permitan al hormigón fresco un fraguado más uniforme y controlado de tal modo que los procesos de curado sean programados de acuerdo a las exigencia de preparación y colocación.
17. La observación de imágenes que presentan la topografía del mortero, pueden ser usados para el estudio del tamaño de partículas en la superficie rugosa y en la superficie de fractura, permitiendo al diseñador de mezclas proponer la granulometría adecuada que garantice una mezcla lo más homogénea posible que interactúe de manera correcta con el refuerzo FRP.
18. Para reforzar la validez cuantitativa de la afirmación sobre mejor comportamiento de los morteros reforzados con FRP vs. reforzados con acero y para poder establecer valores recomendables de esfuerzos de adherencia para uso en diseño, deben desarrollarse futuras investigaciones que incluyan ensayos sistemáticos de "Pull-out", que permitan determinar el esfuerzo cortante de adhesión y de fricción, así como el módulo de cizalladura, G

8.4.5 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA ADHERENCIA ENTRE EL MORTERO Y EL REFUERZO.

El análisis cuantitativo de la adherencia entre el mortero y las barras de FRP arrojó los siguientes resultados teniendo en cuenta que el área de contacto entre el mortero y la barra de FRP era de $99,58\text{cm}^2$ en las probetas con refuerzo circular de 21,86 mm de diámetro; de $43,00\text{ cm}^2$ en probetas con refuerzo circular FRP de diámetro 9.44 mm y para el refuerzo rectangular de sección plana y 5mm de espesor era de $58,00\text{ cm}^2$. En la Tabla 20 se presenta un resumen de los

resultados cuantitativos de adherencia entre el mortero y las barras de refuerzo FRP.

Tabla 20. Resultados cuantitativos de adherencia entre el mortero y las barras de FRP.

PROBETAS REFORZADAS CON BARRAS DE FRP						
	REFUERZO DE SECCIÓN CIRCULAR DE DIÁMETRO 21,86 mm		REFUERZO DE SECCIÓN CIRCULAR DE DIÁMETRO 9,44 mm		REFUERZO DE SECCIÓN PLANA DE ESPESOR 5,00 mm	
No. DE PROBETA	1	2	3	4	5	6
CARGA (Kgf)	1340,00	1545,00	1250,00	1680,00	690,00	655,00
TENSIÓN (MPa)	1,35	1,55	2,91	3,91	1,19	1,13
OBSERVACIONES	Se desliza mordaza inferior (no hay presencia de tinta china en el refuerzo interno)		Brinco en la prensa y arranca fibra del refuerzo (no hay presencia de tinta china en el refuerzo interno)		Brinco en la prensa y arranca fibra del refuerzo (no hay presencia de tinta china en el refuerzo interno)	

En las figuras a continuación se puede observar algunos de los detalles de la prueba cuantitativa de adherencia, realizados en la prensa universal en la escala de 3 T del Laboratorio de Metalografía de la Universidad Nacional, sede Medellín. La preparación de los especímenes, la organización de los dispositivos, y la toma de datos se realizó con base en la información obtenida en las referencias 39 y 40; donde se especifica que el fundamento de las pruebas cuantitativas de adherencia consiste básicamente en tomar los valores de carga en probetas sometidas a tracción y siguiendo la misma metodología de procedimiento al someter las pruebas al análisis. También se enlistan las observaciones y comentarios de la prueba cuantitativa de adherencia en vigas rectangulares de mortero reforzado con barras de FRP.

Figura 72. Extremo inferior de la probeta en la prensa



Figura 73. Comienza registro de carga



Figura 74. Extremo refuerzo FRP que deslizó al momento de falla



Figura 75. Extremos de mortero deslizados y extremos fijos de hormigón con FRP



1. Las probetas para la prueba cuantitativa de adherencia entre el mortero y el FRP fueron diseñadas sin seguir algún tipo de normativa. La idea consistió en crear la manera de fijar las probetas a los dispositivos existentes en el laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional sede Medellín.
2. Como era de esperarse al momento de la falla, y al existir mayor contacto entre el mortero y el FRP en el extremo superior de las mordazas, el desprendimiento del mortero ocurría en la mordaza inferior.
3. En ningún tipo de refuerzo de FRP después de la falla se detecto presencia de tinta china; lo que permite concluir que no existía espacios en la interfase matriz de mortero-refuerzo.
4. Esta prueba no se realizó en probetas reforzadas con acero convencional, ya que los resultados de carga máxima en el ensayo a flexión se toma como valor cuantitativo para la adherencia entre el mortero y el acero convencional.
5. De los resultados obtenidos para las probetas con refuerzo circular de 9.44mm de diámetro se obtuvieron valores muy cercanos; a diferencia de los otros dos casos donde se presento variación mayor en los resultados de carga.
6. Por lo anterior se sugiere la elaboración de un número mayor de probetas que garantice que los datos cuantitativos corresponden a una estadística apropiada para el ensayo.
7. Al tomar los datos de carga y observar las probetas después de la falla, quedaron fibras arrancadas en el refuerzo FRP y otras adheridas al mortero.

9 ANEXO 1

9.1 ANÁLISIS DE COSTOS

En las tablas presentadas a continuación se indica el costo de los FRP analizados en comparación del costo del acero de refuerzo convencional.

El precio correspondiente a cada diámetro está dado para barras de acero de 6 m de longitud. Ver Tabla 23.

Tabla 21. Precios de acero corrugado

DIÁMETRO	PRECIO
1/4"	\$ 1783
3/8"	\$ 3691
1/2"	\$ 6554
5/8"	\$10247
3/4"	\$14748
7/8"	\$20447
1"	\$26937

Los valores consignados para los plásticos reforzados con fibras se encuentran actualizados al mes de Junio de 2004, teniendo en cuenta que a la fecha 1 EURO equivale a \$ 3233.00. Los precios consignados hacen referencia al costo del material por metro lineal.

Tabla 22. Precios FRP

MATERIAL	PRECIO EUROS	PRECIO \$
Durglass	2-5	6466-16165
Carbopree	3-19	9699-61427
Arapree	2-16	6466-51728

Los precios suministrados por SIREG (7). presentan variaciones dentro de un rango de valores, lo cual se debe a la diversa forma de presentación del material, ya que puede ser circular, plana, sección triangular, sección en T y diversas formas de presentación según la aplicación que se requiera.

La resistencia a tracción también es una característica que influye de manera directamente proporcional en el costo del material, es decir, a mayor resistencia requerido del FRP mayor será su costo.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Miravete, Antonio. “Los nuevos materiales en la construcción”, segunda edición , centro politécnico superior, Universidad de Zaragoza, 1995.
2. Vélez Ricardo A y Velásquez Juan D. “Repotenciación de vigas de hormigón mediante el uso de mantos de fibra de carbono”. Trabajo dirigido de grado, Facultad de Minas, 2000. Director Ing. Álvaro Pérez A.
3. Hernández Juan C y Hurtado Liliana. “Reforzamiento a cortante de vigas de hormigón reforzado con cintas de fibra de carbono”. Trabajo dirigido de grado, Facultad de Minas, 2001. Director Ing. Álvaro Pérez A.
4. Bolívar Milton y Gisela Arroyabe. “Morteros Emulsificados y algunas aplicaciones”. Trabajo dirigido de grado 2001. Directora Inga. Claudia Jenny De la Cruz M.
5. Flórez Juan y Natalia Luján. “Estudio de algunos materiales plásticos con fibras de vidrio y aramida y sus aplicaciones a la ingeniería”. Trabajo dirigido de grado 2002. Directora Inga. Claudia Jenny De la Cruz M.
6. ACI. “Criterios de aceptación para reforzamiento de concreto y mampostería reforzada y no reforzada usando sistemas compuestos reforzados con fibras ICBO”. Estados Unidos. 1997. Reporte Técnico No. 55 Concrete Society Committee, Reino Unido, (2001). ACI 440F de Estados Unidos y Guías suministradas por los fabricantes de los sistemas

7. Sireg S.p.A, MAI international. Catálogos de las empresas que proporcionan el material. 2004.
8. Rodriguez R Reinaldo y Bravo C Julián. "Modelación de materiales compuestos y sus aplicaciones". Grupo de matemática y computación de la universidad de la Habana. 2001.
9. Nanni A. Y Salem Faza . "Diseño y construcción con barras de FRP: una tecnología creciente". 1998.
10. Nabil F. Grace y George A. Sayed "Ductilidad de puentes pretensados usando torones trenzados de CFRP". 2000.
11. Guy M. Connelly. "Reforzamiento externo de vigas de hormigón, utilizando fibras de plástico reforzado". Julio-Agosto 1991.
12. Por: Stephen Kurtz y P. Balaguru. "Comparación de matrices inorgánicas y orgánicas, en el forzamiento de vigas de concreto reforzado con mantos de carbón" Miembros del ASCE. Enero de 2001
13. Prentec Hall. "Experimental characterization of advanced composite materials". 1998.
14. Felipe J. Acosta y Hamid Zureick. A. "Determinación experimental de las propiedades mecánicas de losas para puentes de polímeros reforzados con fibras". 2002.
15. Vijay y Hota V.S. GangaRao. "Comportamiento a flexión y deformación de miembros de concreto reforzados con polímeros reforzados con fibra de vidrio, GFRP" . Diciembre de 2001.
16. Pérez, Alvaro. Aportes personales por el Director de la Tesis. 2004.

17. Seminario de diseño de reforzamiento con materiales compuestos FRP. Sika Colombia S.A. Enero 2003. Medellín Club el Rodeo.
18. Nabil f. Grace. "Ductility of prestressed bridges using CFRP strands" . June 1998.
19. Campione, N. MiragliaSayedGangaRao Hota V.S. "FRP reinforcement in bridge deck. Concrete International ACI". Junio de 1998.
20. De la Cruz Morales, Claudia Jenny y Calle, Juan. "Propiedades Físicas , químicas y mecánicas de los cementos colombianos para el diseño de mezclas de hormigón". Medellín 1990. Facultad de Minas.
21. Walter H. Duda. Manual tecnológico del cemento. Micro-estructura del Hormigón. 1.Materias primas. 2000.
22. Caracterización de Materiales. Segundo semestre Maestría en ingeniería de Materiales. Area Materiales y procesos. SEM en el hormigón. Diciembre del 2002.
23. Del Vasto, Silvio. Aportes y correcciones en la revisión de la recopilación bibliográfica de la química del cemento en la evaluación de la tesis. Junio 2004.
24. CHU - KIA WANG & Charles G Salmon. "Reinforced concrete desing" University of Wisconsin Madison, Harper Collins publishers, fifth edition, cap 22 tomo II. 1999.
25. De Lorenzis, Laura y Nanni Antonio. "Characterization of FRP rods as near-surface mounted reinforcement". Journal of composites for construction. Mayo de 2001.

26. Vijay y Hota V.S. GangaRao. "Comportamiento a flexión y deformación de miembros de concreto reforzados con fibra de vidrio, GFRP". Diciembre 2001.
27. Arup Maji, AnaLilia Orozco, Robert Acree. "Análisis de falla en vigas de concreto reforzado con FRP". 2001.
28. B. Benmokrane, O. Chaallal y R. Masmoudi. "Respuesta a flexión de vigas reforzadas con barras de FRP". 2000.
29. Alvaro Forero Mora. "Manual de prácticas de metales". Publicaciones. Universidad Nacional. Bogotá. 1988. METALS HANDBOOK. Fractography. Volumen 12. Novena edición. ASM internacional. USA 1987.
30. Guía para el Diseño y construcción de Concreto Reforzado con Barras de FRP. Reporte del comité ACI-440 . Revisado el 17 de enero del 2000.
31. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente NSR-98. Título C. Tomo I. Ley 400 de 1997. Decreto 33 de 1998. Capítulo C.10.
32. Nemkumar Banthia Natarajan Nandukumar Andrew Boyd. "Rociado de polímeros reforzados con fibras, SFRP desde el laboratorio a un puente real". 1999.
33. A.Ghobarah, M.N. Ghorbel y S.E. Chidiac. "Resistencia torsional de vigas de concreto reforzadas, usando FRP". 2000.
34. ASTM D638. Standard test method for flexural properties of fiber reinforced pultruded plastic rods. 1990.
35. ASTM D4475. Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short beam method. 1990.

36. Concreto bajo el microscopio. Petrografía. Revista Noticreto de la Técnica y de la construcción. Número 61. Páginas 40-46. Octubre, Noviembre y Diciembre de 2001.
37. Caracterización de Materiales. Seminario I. Maestría en ingeniería de Materiales. Area Materiales y procesos. Microscopio Electrónico de Barrido en el hormigón. Diciembre del 2002.
38. De la Cruz, Claudia. "Experimentación y caracterización de compuestos reforzados con nuevos materiales". 2002.
39. "Estudio de la adherencia en materiales compuestos reforzados con fibra Aplicación a hormigón armado" Eduardo Car, Sergio Oller y Eugenio Oñate Vol. 6, nº1, 2001. Revista internacional de Ingeniería de Estructuras. Editores: Alex H Barbat y Reberto Aguiar. Revista semestral. Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador 1996. ESPE, Quito, Ecuador.
- E-mail: alex.barbat@upc.es
raguiar@espe.edu.co
40. Apuntes de Ingeniería. N. 42. 1991. Pontificie Universidad Católica de Chile. Facultad de Ingeniería
41. Mahmoud, Z.; Rizcalla, S.; Zaghoul, E. Transferr and Development Lenghs of Carbon Fiber Reinforcement Polymers Prestressing Reinforcing. ACI Structural Journal, pp 594-602, 1999
42. Iranor. UNE 7436. Método de ensayo para determinar las características de adherencia de las armaduras de pretensado. HULL Derek. Materiales compuestos. Capítulo 6. 1987. Madrid 1982.
43. Dhingra Ashok and Byron Pipes editors, "New composite materials and technology". 1998.

44. FIB. Bond of reinforcement in Concrete. State of the art report, FIB boletín N 10, 2000.
45. Sika CarboDur, reforzamiento con sistemas de fibras de carbono (CFRP) para estructuras de concreto y madera. Guías de diseño e instalación platinas Sika CarboDur, Santa Fe de Bogotá, 2000.
46. Normas Técnicas de la Construcción NTC-120. Método para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico. Páginas 82-88. 1990.
47. Montgomery Douglas. Documento Análisis de Experimentos. 2001. KUEHL Robert O. "Diseño de experimentos, Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones". Segunda edición. Thomson Editores S.A. Pag 2-8. México. 2001
48. Chu- Kia Wag & Charles G Salmon. "Reinforced concrete desing". University of Wisconsin Madison, Harper Collins publishers, fifth edition, cap 22 tomo II.
49. Miravete, Antonio. " La revolución de los nuevos materiales". España, Diciembre de 2000. Página 68-73.
50. Edward R. Fyfe. Duane J. Gee, y Peter B. Milligan. "Concrete international. Rehabilitation of civil structures". Composite systems for Seismic Applications. Junio 1998.
51. Rochel, Roberto. "Hormigón reforzado", NSR 98 primera parte, sexta edición. 1999.
52. Smith, William. "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales" 1998.

53. Shackelford, James F. "Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros". 1998.
54. "Tejidos SikaWrap, reforzamiento con sistemas de fibras de carbono (CFRP) para estructuras de concreto y madera". Guías de diseño e instalación tejidos SikaWrap, Santa Fe de Bogotá, 2000.
55. "Curso Internacional de Plásticos Reforzados. Ingeniería de Producción y Diseño". Septiembre 29 a Octubre 10 de 1997. Medellín. Colombia. (Andercol, UPB, COLCIENCIAS, UVFG-Sudamtex, c.a. (Filial de PPG Industries Inc)).