

45
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

"CAMPUS ARAGÓN"

*Aplicación de fibras sintéticas en el
concreto (Polipileno)"*

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A

Erasmio Rodríguez Rivero

ASESOR:

Ing. Gilberto García Santamaría González

San Juan de Aragón, México.

1997.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

ERASMO RODRÍGUEZ RIVERO
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 7 de octubre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado, "APLICACIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS EN EL CONCRETO (POLIPROPILENO)", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México., 17 de octubre de 1996
EL DIRECTOR


M. en I. CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO


c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil.
c c p Asesor de Tesis.


CCMC/AIR/IIa.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CAMPUS ARAGÓN

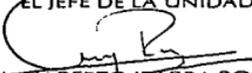
UNIDAD ACADÉMICA

Ing. DANIEL VELAZQUEZ VAZQUEZ
Jefe de la Carrera de Ingeniería Civil
Presente .

En atención a la solicitud de fecha 27 de noviembre del año en curso, por la que se comunica que el alumno ERASMO RODRIGUEZ RIVERO, de la carrera INGENIERO CIVIL, ha concluido su trabajo de investigación intitulado "APLICACION DE FIBRAS SINTETICAS EN EL CONCRETO (POLIPROPILENO)", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del examen profesional.

Sin otro particular, le reitero las seguridades de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, Mex., a 28 de noviembre de de 1996
EL JEFE DE LA UNIDAD



Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

c c p Asesor de Tesis.
c c p Interesado.

AIR/vr





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

*INTEGRACIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS EN EL CONCRETO
(POLIPROPILENO)*

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS
ARAGON**



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON - UNAM
JEFATURA DE CARRERA DE INGENIERIA CIVIL
Of. No. JCIC/154/95



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS
JEFE DE LA UNIDAD ACADÉMICA
P R E S E N T E .

Por medio de la presente se permite relacionar los nombres de los profesores que sugiero integren el Síndico del Examen Profesional del alumno: ERASMO RODRIGUEZ RIVERO, con el tema de tesis: APLICACION DE FIBRAS SINTETICAS EN EL CONCRETO (POLIPROPILENO).

PRESIDENTE :	ING. JOSE MARIO AVALOS HERNANDEZ	01-06-84
V O C A L :	ING. GILBERTO GARCIA SANTAMARIA GLEZ.	30-05-83
SECRETARIO :	ING. CELIA MARTINEZ RAYON	01-06-91
SUPLENTE :	ING. KARLA IVONNE GUTIERREZ VAZQUEZ	15-07-91
SUPLENTE :	ING. JUAN CARLOS ORTIZ LEON	16-03-93

Quiero suplicar que el director de la tesis es el ING. GILBERTO GARCIA SANTAMARIA GONZALEZ, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta escuela.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., noviembre 25 de 1996.
EL JEFE DE CARRERA

M. en I. DANIEL VELAZQUEZ VAZQUEZ



- C.C.D. ING. MANUEL MARTINEZ ORTIZ, Jefe del Departamento de Servicios Escolares.
- ING. JUAN CARLOS ORTIZ LEON, Secretario Técnico de la Carrera de Ingeniería Civil.
 - ING. GILBERTO GARCIA SANTAMARIA GONZALEZ, Asesor de Tesis.
 - COMITE DE TESIS.
 - Interesado.

DVV-onc.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

*DEDICATORIAS
Y
AGRADECIMIENTOS*

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS
A R A G O N**



A DIOS

Te agradezco **DIOS** Mío por alimentar mi espíritu y fortalecer con ello la confianza en mi mismo para salir siempre adelante, hasta lograr uno de mis más deseados anhelos.

Yo te pedí fortaleza para poder triunfar; fui hecho débil, para aprender humildad y obediencia...

Pedí salud para poder hacer grandes cosas; me fue dada flaqueza, para que pueda realizar mejores cosa...

Pedí riqueza para poder ser feliz; se me dio pobreza, para poder ser sabio...

Pedí poder para ser el orgullo de los hombres; se me dio debilidad, para que pueda sentir la necesidad de Ti...

Pedí todas las cosas para poder disfrutar la vida; se me concedió vida, para que pueda disfrutar todas las cosas...

No se me dio nada de lo que pedí; pero todo lo que deseaba y algo más incluso, a pesar de mí; las oraciones que expresé fueron respondidas...

¡De entre todos los hombres, yo he recibido la bendición!

Señor te ofrezco mi esfuerzo para demostrarte que estoy agradecido al lograr mis metas y que no sólo me acuerdo de ti en los momentos de angustia y desesperación.

¿Por qué en mí es en quien se notan los errores y no se perdonan con la felicidad de otros?

¿Por qué tengo que ir abriendo brecha y no puedo utilizar caminos ya trazados?

Yo no puedo dar respuesta a todas mis dudas, pues sólo tú las sabes. Pero a pesar de éstas, y de muchas cosas, jamás intentaré salirme del camino que me tienes trazado, y que estoy descubriendo día con día, así como tampoco voy a eludir ninguno de los problemas que me mandes. Porque dentro de todas mis dudas, sé que este camino es el único que me llevará a convertirme en un hombre. Sé que es el camino más difícil, pero es también el que más vale la pena y el único que puedo voltear a ver con orgullo, cuando este al final de él. Las únicas dos armas que tengo para cruzarlo, son fé y voluntad, la fé en ti y en mí. Sé que si las manejo bien, podré llegar al final. Veamos hasta donde puedo llegar.

A ti **SEÑOR**, te doy las infinitas gracias porque me has permitido la maravillosa oportunidad de existir y me diste la fuerza para lograr mi formación profesional.

Señor concédame;

*Perseverancia y paciencia para aceptar las cosas que no puedo cambiar
Valor para cambiar las que sí puedo y
Sabiduría para conocer la diferencia*

Edgase tu voluntad más no la mía.

A m e n.

Después de **DIOS**, agradezco a mis **PADRES**, ya que gracias a ellos continuamente he tenido todo el apoyo, con el cual he llegado a una de las más importantes metas de mi vida.

A mi **PADRE** por todo lo que me proporcionó, con su labor incansable de su oficio, como en principios morales y éticos, de hecho el gran sentido de responsabilidad que ha mostrado constantemente y ha sabido inculcarme, con sus charlas y consejos que a lo largo de mis estudios y la educación que me ha proporcionado, quizá en su momento no los entendí y a lo mejor hasta los criticé; pero ahora me doy cuenta de lo valiosos que son. También por impulsar mis sueños y gozar mis realizaciones, por su confianza, cariño, firmeza y el respeto de mis decisiones, pero ante todo, le doy las gracias por ser mi amigo, gracias por enseñarme que después de la gran tormenta, siempre sale el sol, un sol cuya luz nos permite ver que el mundo es hermoso.

Y es por eso que hoy le digo a usted que. "Lo Respeto y Lo Quiero PAPÁ".

A usted **MADRE**, no tengo con que corresponderle, por completo lo que ha realizado por mí, créame que la admiro por ser la mujer extraordinaria que me dio la vida, considero que **DIOS** perfeccionó a la mejor madre y me la cedió a mí; nunca voy a olvidar que siempre me ha brindado: su amor, su ternura, su apoyo, su cariño, su honestidad, su lealtad y en dedicarme gran parte de su tiempo, de consagración de su cuidado y desvelo. Por su vitalidad de protección y defender con responsabilidad, orgullo y soberbia la vida de mis hermanas, por permitirme caminar juntos tomados de la mano en el sendero de la vida, por su comprensión, consuelo y serenidad para tranquilizar mi altivez, y por qué no, sus regaños justos al reprenderme para no tropezar con los mismos errores. También por mostrarme con hechos que al lado de un gran hombre siempre hay una gran mujer, tenga la satisfacción de que consiguió inculcar en mí, todo lo bueno de usted y que yo sabré difundir todo lo mejor de mí hacia los demás.

Es por eso que siempre le puedo decir "La Quiero Mucho MAMÁ".

Ya que unidos como pareja, han sabido dar buen ejemplo a mis hermanas y a mí con su dedicación y comportamiento. Gracias por ser mi fortaleza, mi inspiración y mi orgullo, por eso dedico este trabajo como recompensa de homenaje a mis **PADRES**, por esos consejos que influyeron en mí, he aquí los frutos de su cosecha. Gracias, es una de las mejores herencias que he recibido de ustedes su amor y su educación.

*Los sufrimientos...
nos pulen el alma;*

*Mientras que, las alegrías...
le dan brillo.*

A mi Vida

Yo cultivo: la bondad, la sabiduría y la amistad.
 Busco: la verdad, la filosofía y la comprensión.
 Amo: la caballerosidad, el valor y el trabajo.
 Gobierno: el carácter, la lengua y la conducta.
 Aprecio: la cordialidad, la alegría y la decencia.
 Defiendo: el honor, la responsabilidad y a los débiles.
 Admiro: el talento, la dignidad y la gracia.
 Excluyo: la ignorancia, la ofensa y la envidia.
 Combato: la mentira, el ocio y la calumnia.
 Conservo: la salud, el prestigio y el buen humor.

*Lo que trato de evitar,
 no desaparecerá hasta que lo enfrente.*

A mis HERMANAS: **JUANITA y FLORINDA**. Gracias por su gran apoyo incondicional, por su ayuda, por sus consejos, por sus críticas, por su camaradería, por sus ejemplos con los que supe guiar mi camino, por los gratos momentos, algunos amargos y dolientes, que nos han enseñado a madurar y a crecer juntos, unidos y felices; características esenciales que muestran el verdadero valor de la palabra **HERMANOS**. También les agradezco el quitarme la responsabilidad de ayudar y dar consejos a mis sobrinos, aclarándome que ustedes sabían como educarlos. Gracias por alegrar mi vida con sus ocurrencias, chascarrillos y cariño.

Pero sobre todas las cosas "**Gracias Por Ser Mis HERMANAS**".

Mis sobrinos: **Nancy T., E. Cristina, Edgar A., J. Wendy I. Cantera Tapia, Maricela, Lilliana I. y Javier Huerta Tapia**. Que les sirva como motivación para sobresalir y tratar de ser mejores en cada faceta de sus vidas y quiero que sepan más que nada que los Quiero aparte los respeto así como a sus papás **Juan Manuel Santos Cantera Ramírez y D. Javier Huerta González**.

Por otra parte, extendiendo con gratitud a quien soportó y aguantó todo lo que conllevó la carrera y la realización de este trabajo: Carencias, escasas diversiones, falta de tiempo, pocas salidas a lugares recreativos y puntos de interés, tensión, trabajos, tareas, fatigas, etc., sin encontrar en ella reclamo alguno sólo optimismo y paciencia. Hoy al concluir mi tesis te la dedico por tu comprensión, tenacidad y por afirmar que no debo depender de nada ni de nadie, ya que con esto forje mi esfuerzo y empeño para la realización de este proyecto hecho realidad.

La persona a la que me refiero es **mi Novia, mi Compañera y mi Amiga** a quien sólo lo puedo decir "te amo con lo más profundo de mis sentimientos" lo logre, gracias.

Un agradecimiento y dedicatoria muy especial a las personas que hicieron posible la realización de este trabajo, ya que sin ellos no sería una realidad ahora, al ayudarme desinteresadamente, al asesorarme y proporcionar todo lo que necesite, teniéndome paciencia cuando no salían las cosas como se habían planendo; pero al fin después de algún tiempo se concluyó esta tesis.

Realmente una gran parte del mérito es para el *Ing. Gilberto García Santamaría González*, la otra es para el *Ing. Rolando Rodríguez Sobreya*. Les doy las más sinceras gracias.

Gracias al *Ing. Donato Figueroa* del Departamento de Estructuras y *Lic. Rogelio Molotla* del área Bibliotecaria, del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

al *Ing. G. Acosta J.* de fibras FIBERMERHS de la Empresa FIBEROL, S.A. de C.V.
al *Arg. José Luis Morales* de fibras FIBERCON de la Emp. DISFIPCON, S.A. de C.V.
al *Direct. Héctor A. Méndez* de fibras FIBERCRETE de la Emp. DISYDES, S.A. de C.V.

Por todas las atenciones que tuvieron para conmigo, por toda la información y ayuda proporcionada que hizo posible este trabajo.

Como olvidar a la Sra. Asunción Rojas O. (*Doña Chona*) que me acogió y me brindó su confianza, en los momentos críticos de mi vida y que más lo necesitaba cuando sólo contaba con el apoyo de mi madre. Sus hijos "*Pato*", "*Batis*" y *los demás* llegamos a trabajar con la esperanza de salir adelante y al parecer lo logramos. A los *Hermanos Luis, Primo y Alberto Portuquez Salazar* por su enseñanza y consejos recopilados en el oficio de la *Protección*. In cual disfruta y siempre valora las actividades que desempeñaba, en cada quema de los trabajos que realizamos. Muchas gracias ya que por todo esto me hice más responsable, disciplinado y persistente, hoy y siempre lo llevaré presente en mi vida cotidiana.

A las Escuelas primarias:

- "Celso Flores Zamora" Turno Matutino, Generación 74-76.
- "Cuauhtémoc" Turno Matutino, Generación 76-77.
- "República de Hungría" Turno Matutino, Generación 77-80.

Mis entrañables compañeros: Chuchín, Amparo, Cesar P.M., Patricia D.M., Marco Antonio, Pablo, Roberto, J. Luis (japonés), Rubén, Gloria B., Marcos(?), Rosalinda, Beto, Arturo, etc. y Profesores. En especial a la *Profesora Catalina* por lo maternal de su comprensión, en forjar mis primeros pasos en el sendero de la vida.

A la Escuela Secundaria 89 "República de Ecuador" T. Vesp., Generación 80-83.

Como olvidar a mis amigos y compañeros: Claudia T.H., Magdalena R.S., Mario y Martha G.V., Antonio L.A., Rosa Iráis, Armando V.M., Rosario, Gabriela, Alma, Olga, Lourdes Atilano y Alvarez, etc. En el esmero y labor de trabajo que desarrollo la *Profesora Guadalupe Pola*, la respeto por las palabras de aliento, en ser útil para la vida y la sociedad.

Al "Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios N° 29" Turno Vespertino, Generación 85-88.

No habrá otra generación que sea mejor, como mis amigos y compañeros: "Polo" y "Batis" P.R., Araceli A.T.A., Claudia P.E. Verónica A., Leonides, Judith, Rocio, "Beky", Roxana, Angeles, "Rufos", etc. La virtud de expresar con sentimiento y el llegar a la meta fue lo que el Profesor *Victor Manuel* nos inculco.

*como agradecimiento a esas peticiones,
le muestra este trabajo.*

Gracias a mis compañeros de la "Generación (1989 - 1993)" y amigos de la "Escuela Nacional de Estudios Profesionales Campus ARAGON". Por compartir conmigo tantas cosas maravillosas que dejaron huellas imborrables en nuestras vidas.

Agradezco nuevamente, ahora a mi asesor el *Ing. Gilberto García Santamarta González*. Por haberme apoyado en mi lucha, por desarrollar al máximo las potencialidades de mi vida, por la confianza que deposito en mí al aceptar dirigir y asesorar mi tesis, además por ser una persona honesta con gran calidad humana, pero sobre todo por brindarme su amistad.

Gracias a mis Sinodales los Ingenieros: *Ing. José Mario Avalos Hernández*
Ing. Gilberto García Santamarta González
Ing. Celia Martínez Rayón
Ing. Karla Ivonne Gutiérrez Vázquez
Ing. Juan Carlos Ortiz León.

Por aceptar ser jurado para mi examen profesional, por sus atenciones, por el apoyo brindado, por su amistad y confianza puesta en mí.

Gracias a todos y cada uno de mis *Profesores* que compartieron parte de lo que desempeñan y han obtenido através de años de experiencia en la carrera, conmigo, fijaron los cimientos para mi realización profesional, incitándome a buscar la solución a los problemas que se me puedan presentar y con gran seguridad les puedo decir, no los voy a defraudar, agradecido estoy de ustedes *Profesores*.

Gracias a mis compañeros y amigos de trabajo en la "*Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica*". Por la confianza, y paciencia, para la realización de trabajos, recorridos y apoyos entre las oficinas de la "*Unidad Departamental de Planes Hidráulicos Delegacionales*".

En fin, hago un extensivo agradecimiento a todas aquellas *Personas* que no menciono, que de alguna forma contribuyeron con la elaboración de esta tesis y me han hecho pensar mucho en lo que debo superarme, para mañana poder brindar lo que este en mi alcance; y no me estoy refiriendo tan solo en lo material sino a una formación que me gustaría ofrecer y que sólo puedo hacer si me preparo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

I N D I C E

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS
A R A G O N**



I N D I C E

PROLOGO	VI
INTRODUCCION	VIII
I. CARACTERISTICAS DE LOS PRODUCTOS DE FIBRAS SINTETICAS PARA LOS CONCRETOS	I
I.1 ANTECEDENTES HISTORICOS	1
I.1.1 TRABAJO EXPERIMENTAL	2
I.1.2 PRIMEROS DESARROLLOS	4
I.1.3 MATERIALES DE FIBRA	4
I.1.4 ESTADO DE DESARROLLO	6
I.1.5 HISTORIA	7
I.1.6 INFORME	9
I.1.7 EL PAPEL DE LAS FIBRAS EN EL CONCRETO	10
I.2 TERMINOLOGIA DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS	11
I.2.1 MATERIALES DE FIBRA	11
I.2.1.1 GEOMETRIA DE LA FIBRA	11
I.2.1.2 DIAMETRO EQUIVALENTE	11
I.2.1.3 PROPORCION DEL ASPECTO DE LA FIBRA	11
I.2.2 DINER DE LA FIBRA	12
I.2.2.1 DINER DE PRE Y POST MEZCLADO	12
I.2.2.2 CANTIDAD DE FIBRA Y SUPERFICIE	13
I.2.2.3 FUERZA Y RESISTENCIA	13
I.3 MATERIALES CONSTRUCTIVOS DEL CONCRETO	14
I.3.1 CONCENTRACION DE VOLUMEN DE LA FIBRA Y TECNICAS DE PRODUCCION	15
I.3.2 CONCRETO	16
I.3.3 CEMENTO	16
I.3.4 AGREGADOS	17
I.3.5 FIBRAS	17
I.3.5.1 FIBRAS DISPONIBLES	17
I.4. COMENTARIO DE DISTINTAS FIBRAS	20
I.4.1 ASBESTO	20
I.4.2 CELULOSA	22
I.4.3 FIBRAS MINERALES SINTETICAS	23
I.4.4 FIBRAS PLASTICAS	25
I.4.5 FIBRAS DE ACERO	26

APLICACION DE FIBRAS SINTETICAS EN EL CONCRETO (POLIPROPILENO)

I.5	MATRICES DE MATERIALES FRAGILES, REFORZADOS CON FIBRA	27
I.5.1	MATRICES ORGANICAS E INORGANICAS	28
I.6	MECANISMOS DE COMPORTAMIENTO	30
I.6.1	MECANISMOS DE CONTROL DE GRIETAS CON FIBRAS DE REFUERZO	32
I.6.2	CONCEPTOS DE ESPACIAMIENTO	32
I.6.3	ESPACIAMIENTO EFECTIVO	34
I.6.4	RELACION ENTRE LAS ECUACIONES DE ESPACIAMIENTO EXISTENTES	34
I.6.5	UNA PROPOSICION DEL MECANISMO ASOCIADO CON EL CONTROL DE LOS AGRIETAMIENTOS EN UN MATERIAL COMPUESTO CON FIBRAS DE REFUERZO	35
I.6.5.1	MECANISMO DE FIBRA DE REFUERZO	36
I.6.5.2	LONGITUD CRITICA DE LA FIBRA	37
I.6.5.3	ADHERENCIA INTERFACIAL MATRIZ-FIBRA	38
I.6.5.4	EFICIENCIA DE LAS FIBRAS ORIENTADAS ALEATORIAMENTE	39
I.6.5.5	ESPACIAMIENTO EFECTIVO DE LAS FIBRAS PARA FIBRAS CORTAS DISCONTINUAS	39
I.6.6	RESISTENCIA A LA FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS CORTAS Y DISCONTINUAS ORIENTADAS AL AZAR	42
I.6.7	RELACION ENTRE EL ESPACIAMIENTO DE LA FIBRA Y LA RESISTENCIA A LA FLEXION	45
I.6.8	RESUMEN DE LOS MECANISMOS DE COMPORTAMIENTO	55
I.7	CONSIDERACIONES DE PRODUCCION Y DISEÑO DE LOS COMPONENTES	56
I.8	LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES EN MECANISMO DE FRACTURA	57
I.8.1	PARAMETROS IMPORTANTES DE LA FIBRA	57
I.8.2	ESFUERZO Y DISPERSION DE LA ENERGIA DE LA TENSION	60
II.	MODELOS EXPERIMENTALES DE CONCRETO CON FIBRAS SINTETICAS	61
II.1	RELACION ENTRE EL ESPACIAMIENTO DE LA FIBRA	62
II.2	APLICACION DEL CONCRETO REFORZADO CON LA FIBRA DE POLIPROPILENO	65
II.2.1	FIBRAS DE POLIPROPILENO	66
II.2.2	CONCRETO CON FIBRAS	66
II.2.3	POLIPROPILENO	67
II.3	FABRICACION Y UTILIZACION DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRA DE POLIPROPILENO	68
II.3.1	RESISTENCIA DE LOS CONCRETOS	68
II.3.2	DEFORMACION Y COMPORTAMIENTO EN FLEXION DE LOS CONCRETOS	69
II.3.3	RESISTENCIA AL IMPACTO DEL CONCRETO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO	69

II.4	MANEJO Y COLOCACION DEL CONCRETO CON FIBRA	73
II.4.1	ANTECEDENTES GENERALES DEL USO DE CONCRETO CON FIBRAS	73
II.4.2	TIPOS DE FIBRAS	74
II.4.3	TIPOS DE POLIPROPILENO	74
II.4.4	TIPOS DE POLIPROPILENO (APLICACIONES)	75
II.5	DISEÑO DE MEZCLA	75
II.6	PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO CON LA FIBRA	77
II.6.1	MEZCLADO DEL CONCRETO CON FIBRAS	78
II.6.2	SECUENCIA DEL MEZCLADO	79
II.6.3	EFICIENCIA DE LA FIBRA	80
II.7	COLOCACION, DESCIMBRADO Y COLADO DEL CONCRETO REFORZADO CON LA FIBRA	80
II.8	COMPACTACION DEL CONCRETO CON FIBRAS	81
III	ANALISIS DE RESULTADOS	83
III.1	GRIETAS EN EL CONCRETO	84
III.2	TIPOS DE GRIETAS	85
III.2.1	GRIETAS POR CONTRACCION PLASTICA Y POR CONTRACCION POR SECADO A LARGO PLAZO	86
III.2.2	GRIETAS SUPERFICIALES	89
III.2.3	GRIETAS PROVOCADAS POR CONTRACCIONES TEMPRANAS DE TEMPERATURA (RESTRICCIONES FISICAS)	89
III.2.4	GRIETAS POR ASENTAMIENTOS PLASTICOS	90
III.3	CAUSAS DE AGRIETAMIENTO	91
III.4	METODOS DE PREVENCIÓN O DISMINUCIÓN DE AGRIETAMIENTO	91
III.4.1	METODOS COMUNES	91
III.4.2	CONCRETO	92
III.4.3	ACABADO	92
III.4.4	CURADO	92
III.4.5	JUNTAS	93
III.4.6	RECUBRIMIENTO	93
III.5	USO DE FIBRAS	94
III.5.1	CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS	94

III.6	PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO ELABORADO CON FIBRAS	95
III.6.1	COMPORTAMIENTO	95
III.6.2	RESISTENCIA ESTATICA	96
III.6.3	RESISTENCIA DINAMICA	97
III.6.4	RESISTENCIA A LA FATIGA	97
III.6.5	FLUENCIA	97
III.6.6	CORROSION DE LAS FIBRAS DE ACERO	97
III.6.7	RESISTENCIA A LA ABRASION	98
III.6.8	CONDUCTIVIDAD TERMICA	98
III.7	RESULTADOS Y OBSERVACIONES	99
III.7.1	RESISTENCIA A LA COMPRESION	99
III.7.2	COMENTARIOS A LAS PRUEBAS	99
III.8	EVALUACION DE AGRIETAMIENTO EN LOSAS	103
	CONCLUSIONES	104
	BIBLIOGRAFIA	108



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

P R O L O G O

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
C A M P U S
A R A G O N



PROLOGO

Este documento tiene la intención de tratar el tema del concreto reforzado con fibra sintéticas (CRFS), con fines meramente didácticos, está dividido en dos partes principales: la primera es la mecánica del comportamiento de una gran variedad de tipos de CRF, la segunda describe las distintas aplicaciones del CRF, sus métodos de comprobación, la tecnologías de producción y la comprobación de las pruebas realizadas de laboratorio. El documento tiene como finalidad obtener el antecedente de la mecánica de comportamiento del CRFS.

El documento esta encaminado a proporcionar un conocimiento acerca de la mecánica del comportamiento del CRFS, así como su utilización comercial. El tema por si mismo muy extenso si consideramos la gran variedad de materiales y formulaciones que se derivan del CRFS, por ejemplo, el tipo de CRFS cambia con solo variar los componentes del concreto, el tipo de fibra, su distribución, su geometría o su densidad. Por consiguiente se presume que existe un gran número de teorías del comportamiento mecánico para el CRFS. Después de todo, aunque la frase CRFS representa una terminología muy general, estos materiales no deben de ser considerados como tales para propósitos de análisis y de diseño. Sin embargo, con el conocimiento que se tiene del tema se puede tener una noción aproximada de como la fibra actúa para mejorar el desempeño de los materiales en la construcción de derivados del concreto. Esto se puede comparar con la mecánica de la Ingeniería Moderna llamadas comúnmente métodos de la energía de la tensión. En ocasiones estos conceptos no son aplicados por la mayoría de los ingenieros y arquitectos de hoy en día, pero para lograrlo se requiere solamente de una mente abierta, comprendimiento concepto el analista puede en un momento dado interpretar sus resultados con los métodos mecánicos de análisis más conocidos, como es el caso de los aplicados al concreto reforzado.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INTRODUCCION

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS
ARAGÓN



INTRODUCCION

Cada año de gastan millones de pesos en la construcción de estructuras importantes como puentes, presas, tanques, edificios, pistas de aeropuertos, etc. y muchos millones más en reparación y restauración de las estructuras deterioradas por la corrosión el uso y el tiempo. En muchas ocasiones a los pocos años de haberse terminado la obra.

En nuestros días ha adquirido gran importancia la búsqueda de materiales que revolucionen a los utilizados tradicionalmente. (tabique, concreto y acero de refuerzo), para realizar estructuras más durables y resistentes.

Uno de esos nuevos materiales son las fibras de polipropileno que actualmente se utilizan con éxito en más de 30 países incluyendo México.

Los primeros estudios con fibras de polipropileno datan de principios de los años 60's cuando la División de Desarrollo de la Armada de los Estados Unidos, lo consideró el material sintético más apropiado desde el punto de vista de funcionamiento y economía para el concreto. La evolución continuó y culminó en 1983 cuando las fibras fueron perfeccionadas como un esfuerzo conjunto de ingenieros especializados en concreto y manufactura de fibras sintéticas.

Una de las características más importantes del concreto con fibras es su alta resistencia al agrietamiento y la propagación de grietas. Como un resultado de esta capacidad para contrarrestar grietas, el compuesto de fibra-concreto posee alto alargamiento a la rotura y resistencia a la tensión cuando se presenta la primera y última grieta respectivamente, bajo carga de flexión; las fibras pueden sostener a la matriz aún después de un agrietamiento excesivo. La ganancia resultante de todo esto, es impartir el compuesto de fibra-concreto una alta ductilidad en el post-agrietamiento el cual es desconocido en el concreto ordinario. La transformación de un material frágil a un material dúctil, por medio de las fibras incremento consecuentemente las características de absorción de energía del compuesto y su capacidad para resistir cargas de impacto o cargas repetidas.

Pruebas realizadas en Webster Engineering Associates, Inc., han demostrado que la adición de fibras de polipropileno al concreto en estado plástico incrementa sustancialmente la resistencia del concreto al agrietamiento por contracción y asentamiento plástico y vibraciones a edades tempranas.

La adición de 900 gr por m³ de fibras de polipropileno de 3/4 (19 mm) al concreto incrementan la capacidad contra el agrietamiento en el estado plástico, así como en el estado endurecido a edades posteriores. Esto es particularmente importante puesto que una gran cantidad de las grietas del concreto ocurren en las primeras 12 horas después de colocado, en este periodo, el concreto es más susceptible a las vibraciones, contracciones asentamiento plástico. El agrietamiento a edades tempranas del concreto afecta el incremento neto de la permeabilidad del concreto y debido a que grandes áreas de la superficie de las estructuras se ven expuestas a el medio ambiente, "principalmente en las estructuras ubicadas cerca de la costa", se reduce sustancialmente la vida útil de las estructuras, al verse expuestas a la humedad, sales y cloruros llevados por la brisa marina que penetran al concreto y provocan el deterioro y la corrosión del acero de refuerzo y ocasionan que se gaste mucho dinero en reparaciones, en muchos casos a los pocos años de terminada la obra.

Como resultado de las pruebas realizadas por diferentes laboratorios hemos visto que la adición de fibras reduce el porcentaje de los iones de cloruro, de forma que retarde la corrosión de las barras de refuerzo. Nuestras pruebas indican que las barras de refuerzo en el concreto reforzado con fibras de polipropileno requieren del doble de tiempo para que se inicie la corrosión en comparación con las barras en el concreto sin fibras.

Un aumento en la cantidad de fibras al concreto mejorara casi en la misma proporción las características de permeabilidad del concreto.

La conducta de post-agrietamiento del concreto reforzado con fibras proporciona gran tenacidad. Las fibras de polipropileno pueden absorber mayores cantidades de energía y continuar soportando la carga después de que ocurre el agrietamiento. Esta tenacidad, la cual es definida en la publicación de ACI-SP-44 como la absorción de energía anterior a la separación completa del concreto, ha demostrado incrementos significativos en las pruebas realizadas.

En el concreto reforzado con fibras de polipropileno el agrietamiento ocurre cuando el material está sujeto a deformaciones más allá del alargamiento a la rotura de la matriz (concreto), del mismo modo que en el concreto reforzado ordinario cuando éste es reforzado en la zona de tensión más allá del alargamiento a la rotura del concreto. La manera como actúan los componentes fibra-concreto es entonces lo más importante, especialmente sobre la última parte de la curva esfuerzo-deformación, donde un incremento en el número de grietas en la matriz hace que el esfuerzo tome todo y aún, una porción más grande de la carga en la zona de tensión.

El concreto reforzado con fibras contiene suficientes fibras para que tomen todo el esfuerzo a tensión donde quiera que la matriz se agriete y además las fibras están tan bien ancladas por todas partes que el material puede tolerar deformaciones considerablemente más altas antes de la rotura final; este incremento en la deformación no se debe tomar en cuenta para el diseño.

Al colocar el concreto éste se encuentra en el estado plástico parecido al líquido para facilidad de colocación y consolidación. Después de colocado, el concreto empieza a asentarse y perder agua por evaporación por la parte superficial mientras se aproxima el periodo de fraguado y el cemento empieza a hidratarse. Entonces la transformación del concreto del estado plástico al endurecido empieza tener lugar. Es durante este periodo de asentamiento que el concreto es más vulnerable a las fuerzas y muchos de sus efectos de nacimiento grietas por contracción plástica y asentamiento plástico, pueden también formarse.

Durante el estado plástico, el concreto pierde agua por evaporación y sangrado que causan que el concreto tienda a contraerse. Esta contracción, no obstante, es conocida como la resistencia debida a las restricciones causadas por la cimbra, la base, el acero de refuerzo, etc. Las restricciones tratan de sostener al concreto en su lugar y provocan fuerzas de tensión en el concreto que trata de contraerse. Estas fuerzas de contracción plástica son pequeñas al principio, pero pueden crecer rápidamente durante el fraguado dependiendo éstas de contracción plástica son pequeñas al principio, pero pueden crecer rápidamente durante el fraguado dependiendo éstas de la tendencia a la contracción. Estas pueden ser liberadas únicamente por causa de las grietas que se forman en el concreto. después de que el concreto ha endurecido, las fuerzas provenientes de la contracción son menores y eventualmente se estabilizan en niveles de energía menores.

Durante el estado plástico, el concreto exhibe una gran resistencia a los esfuerzos de tensión (el agua no sufre grietas); por consiguiente, tiene una alta capacidad a la tensión. Dos factores ocurren mientras el concreto está en estado plástico:

- (1) Las fuerzas de contracción plásticas son bajas.
- (2) La capacidad para resistir las fuerzas de contracción plástica es alta

Quando el concreto entra el periodo de fraguado éste empieza a perder la capacidad de resistir fuerzas y las fuerzas de contracción plástica empiezan a incrementarse. Comúnmente habrá un periodo de tiempo cuando la energía de las fuerzas de contracción plástica puede exceder la capacidad de las fuerzas de tensión del concreto durante el tiempo de fraguado. Es aquí donde el concreto puede desarrollar muchas grietas de contracción plástica comunes. Estas grietas tempranas, las cuales generalmente pasan a través de las losas, pueden ser, inmediatamente visibles, o estas pueden ser tapadas superficialmente durante el terminado y únicamente se volverán visibles a edades posteriores.

Quando la fibra de refuerzo está en forma de fibras discretas y cortas actúan efectivamente como inclusiones flexibles en la matriz de concreto, y físicamente tienen el mismo orden de magnitud de los agregados; el refuerzo de fibras por lo tanto, no puede ser considerado como un reemplazo directo del refuerzo longitudinal en miembros de concreto reforzado o presforzado. La presencia de las fibras en el cuerpo del concreto pueden mejorar la resistencia al agrietamiento, la flexión y la funcionalidad y servicio de miembros convencionales de concreto reforzado.

Técnicas de control de fibras de concreto

El polipropileno ha sido una fibra verdaderamente milagrosa para muchas industrias, y durante varios años anteriores, ha estado reconocida como parte integrante principal para mejorar las mezclas de concreto. Actualmente el polipropileno y otras fibras sintéticas son las causantes del mayor avance de la tecnología en el concreto, desde el arrastre de aire.

Son muy ligeras, con gravedad específica de 9.1; muy fuertes con resistencia a la tensión de 80-110 ksi; e inertes químicamente, las fibras de polipropileno no se oxidan, ni se corroen, ni absorben agua. El polipropileno no se afecta por los álcalis en el cemento, y por lo tanto no se debilita en el proceso de envejecimiento, como sucede con los aditivos de vidrio. Por ser antioxidable, el polipropileno no manchará el concreto terminado como lo hace el acero.

Hay un número de tipo de fibras y materiales que pueden emplearse, y la selección adecuada de la fibra específica para un proyecto determinado, debe ser efectuada por un técnico familiarizado con la industria textil y con amplios conocimientos de ingeniería de la construcción. El empleo de fibras sintéticas es particularmente grande en trabajos lisos, en concreto de prefunción de esta industria. Su valor viene a ser como un refuerzo secundario y puede reemplazar las mallas de alambre, fibras de acero o fibras de vidrio.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

C A P Í T U L O 1

***CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE
FIBRAS SINTÉTICAS PARA LOS CONCRETOS***

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
C A M P U S
A R A G O N**



I. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE FIBRAS SINTÉTICAS PARA LOS CONCRETOS

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Hace más de treinta años que se llevaron a cabo en el Instituto de Tecnología de Carnegie, las primeras investigaciones y el desarrollo del concreto reforzado con fibra (CRF).

Durante las últimas tres décadas cientos de documentos sobre el tema han sido publicados; gran número de estudiantes han realizado trabajos de investigación y monografías del CRF contribuyendo a su desarrollo. Solamente viendo el gran número de seminarios, simposiums y conferencias internacionales que se llevan a cabo todos los años y por todo el mundo, uno puede darse cuenta del interés tan grande que hay sobre el CRF. Las metas de dichos programas se encaminan a transmitir los resultados de todas estas investigaciones al sector empresarial.

Las dos últimas décadas se han caracterizado por los diversos adelantos que han tenido lugar en la industria de la construcción, en la tecnología del concreto, en técnicas de proyecto y en nuevos minerales. Uno de los nuevos adelantos en materiales está representado por el concreto reforzado con fibras cortas de pequeña área de sección transversal y longitud corta situadas aleatoriamente en toda la masa del concreto. Muchos factores influyeron sobre el esfuerzo efectivo de la matriz y la transferencia eficaz del esfuerzo entre fibra y la matriz, pero las propiedades del compuesto reforzado con fibras cortas dependen sobre todo del tipo de fibra. Una de las fibras que ha encontrado un número considerable de aplicaciones en el concreto es la fibra corta de acero.

El objeto de la inclusión de fibras cortas en matrices de cemento es el de mejorar las propiedades de deformación y resistencia mediante el uso de deformación de la matriz sujeta a esfuerzos, haciendo que ésta transfiera carga a la fibra. De esta forma las fibras controlan el avance de las grietas producidas por las deformaciones, produciendo fuerzas de apresamiento en los extremos de las grietas, creando un periodo de propagación de grietas lento y distinto.

La inclusión de fibras en las mezclas de concreto genera nuevas propiedades en los concretos en su estado fresco, como es, entre otras, el incremento del aire atrapado, relacionada con la durabilidad de los concretos. Otras propiedades mecánicas del concreto endurecido como son el incremento de resistencia encuentran su explicación, en la concentración de las fibras y la relación de aspecto L/d. Son de gran importancia en la obtención de los resultados deseados, la comprensión de las propiedades específicas de cada fibra, ya que redundan en la categoría de los productos finales.

Aún cuando el concepto de reforzar una matriz débil y quebradiza con fibras no es nuevo, si lo es relativamente, su aplicación en el concreto, y el concreto reforzado con fibras cortas de acero se encuentra aún en etapa experimental, en gran medida. A menudo la formulación de la mezcla y las características de manejo determinan la adecuación del nuevo material en aplicaciones prácticas, y en la industria de la construcción existe siempre un lapso de tiempo entre los adelantos en laboratorio y sus usos en la práctica. No obstante se han encontrado varias aplicaciones en la obra del concreto reforzado con fibras de acero, tan solo en una década, dicho material ha pasado de ser un mero experimento de laboratorio, al constituirse en un material probado de construcción para el futuro.

El desarrollo de este material ha estimulado una gran cantidad de aplicaciones, que pretenden ser soluciones prácticas de problemas de ingeniería y un auxiliar valioso en el campo de los materiales en la industria de construcción.

Sin embargo todas las posibilidades del nuevo material se aprecian solamente si se entiende con claridad su comportamiento, sus ventajas y sus indudables limitaciones.

1.1.1 TRABAJO EXPERIMENTAL

Un objetivo básico de este trabajo es la verificación teórica y práctica en base a las experiencias y alcances logrados en la actualidad en el campo de los materiales reforzados con fibras cortas. El aspecto teórico se fundamenta en trabajos de investigación agrupados por el comité ACI 544 Fiber Reinforced Concrete y demás publicaciones relacionadas con el material.

El aspecto práctico enfoca su actividad a la prueba y verificación de ciertas propiedades deseables en los concretos, en el laboratorio y sus posibles aplicaciones en la práctica. Las propiedades estudiadas son: la resistencia a la compresión simple, resistencia a la tensión indirecta y resistencia a la flexión. Complementa su estudio, el reporte de las características de las mezclas con fibras, las características de la falla en los especímenes de concreto.

En el trabajo de laboratorio se usaron los tipos de fibras, que han generado en la actualidad, una gran cantidad de trabajo y que son las fibras de vidrio, las fibras de acero y las fibras de polipropileno. El trabajo de laboratorio, pretende establecer en cierta forma, las propiedades del concreto reforzado con fibras a partir del trabajo experimental.

Existen varios ejemplos del uso de fibras, para reforzar matrices frágiles y débiles, desde los principios de la historia de la humanidad. De los materiales compuestos naturales tenemos la madera, el hueso, etc., más el ingenio humano hizo que la fibra de asbesto (Authophyllita) descubierto en Finlandia a principios del año 2,500 a.C. se usara para dar propiedades resistentes a los productos horneados en la alfarería. Constituyendo de esta forma el desarrollo de un material compuesto, con arcillas y fibras minerales. El pelo de caballo y el sisal se usaron en muros de barro y paneles de yeso, la paja constituyó una forma de refuerzo en los adobes; la filosofía de la acción del compuesto se usó en la fabricación de las hojas de las espadas en épocas medievales. Los romanos también usaron las fibras como refuerzo.

Con la aparición de cemento Portland, se presentaron muchas posibilidades de desarrollar nuevos y más ventajosos materiales compuestos como el concreto reforzado convencional.

Aunque los desarrollos modernos de compuesto de cemento reforzado con fibras, parten de las dos últimas décadas, el uso más reciente de elementos reforzados con matrices de cemento es probablemente debido a BERARD en 1874. PORTER en 1910 mejoró el concreto como un verdadero material estructural homogéneo con la inclusión de piezas cortas de acero. Desde entonces varias patentes de elementos de refuerzo se han registrado, por GRAHAM (1910), FICKLIN (1914) KLEINLOGEL (1920) SEAILLES (1920) y MARTIN (1927). Al mismo tiempo se reconoció que el uso de fibras como material de refuerzo produce un concreto moldeable que se puede mecanizar así como el uso de fibras planas y corrugadas en la fabricación y moldeo de tubos.

La necesidad de mejorar la forma de la fibra, y la importancia del concepto de la adherencia entre la matriz y la fibra fue reconocido por MEISCHKE-SMITH (1920). ETHERIDGE (1933) utilizó alambre torcido y con caras planas, más tarde se utilizaron fibras de diferentes tamaños y diámetros para mejorar la resistencia al agrietamiento y fractura del concreto. Las ideas de CONSTANTINESCU (1943) merecen especial atención ya que ellas sintetizan la similitud entre los desarrollos modernos de los compuestos de fibra y cemento y las primeras sugerencias de reforzar con fibras surgidas entre 1900 y 1940.

Mucho de los esfuerzos para desarrollar concreto reforzado con fibras es debido al uso de fibras y estropajos de refuerzo en resinas epoxy, metales y cerámicas. Plásticos reforzados con fibra de vidrio y compuestos de resinas y fibras de carbón se están desarrollando actualmente, las cuales muestran la necesidad de consideraciones especiales de ingeniería en el diseño tales como ductilidad y comportamiento anisotrópico.

Los primeros desarrollos más formales de cemento y concreto reforzado con fibras cortas, se deben a ROMUALDI, BATSON, KRENCHER y BIRGUKOVICH, desde entonces el proceso de desarrollo del concreto reforzado con fibras ha sido continuo y constante.

I.1.2 PRIMEROS DESARROLLOS

Partiendo de la baja resistencia a la tensión, y la naturaleza frágil del concreto, estas desventajas se han remediado con el uso de varillas de refuerzo en la zona de tensión del concreto desde mediados del siglo XIX.

Las investigaciones de ROMUALDI-BASTON y ROMUALDI-MANDEL en alambres continuos y paralelos dispuestos en las direcciones paralelas y perpendicular a la aplicación del esfuerzo principal y con fibras cortas de alambre dispersas y colocadas al azar a fines de 1950 y principios de 1960 fue la base de una patente apoyada en el esparcimiento de las fibras. La ASOCIACION DE CEMENTO PORTLAND estudio el reforzamiento de la pasta de cemento portland, mortero y concreto. Otra patente basada en la adherencia y en la relación de aspecto de la fibra fue otorgada en 1972 a SHAH S.P. de la Universidad de Chicago Illinois. En los principios de los 60's se realizaron experimentos usando fibras plásticas en concretos con y sin refuerzo de barras de acero y mallas de alambre. En E.U. se ha experimentado con fibras de vidrio desde principios de 1950, así como en Inglaterra y Rusia, se han realizado aplicaciones de concreto reforzado con fibras desde la mitad de los 60's en carreteras, losas de pisos, materiales refractarios y productos de concreto. En la mayoría de los experimentos realizados en E. U. se han utilizado fibras de acero con agregados de peso normal y cemento Portland como aglomerante.

I.1.3 MATERIALES DE FIBRA

De los tipos de fibras usadas como refuerzo de pasta de cemento y concretos se han utilizado las siguientes: fibras de origen orgánico, como el nylon, polipropileno y polietileno; y de origen mineral, como el acero, asbesto y vidrio. Las fibras de origen orgánico que no son susceptibles al ataque químico en la pasta de cemento como las de arriba mencionadas, tienen algunas deficiencias como: baja resistencia al calor, bajo módulo de elasticidad, no mejoran significativamente la resistencia de la matriz del cemento Portland, y en algunos casos la reducen. Presentan dificultad para mezclarse y distribuirse en el concreto fresco y tienen poca adherencia. Sin embargo se ha observado un aumento considerable de la resistencia al impacto de elementos de concreto reforzados con fibras de nylon y polipropileno.

Las fibras minerales han mostrado un buen comportamiento como refuerzo del concreto. Las fibras de acero tienen buenas propiedades para utilizarse con este fin, aunque puede llegar a sufrir corrosión si no se le protege adecuadamente, siendo generalmente caras.

El asbesto ha sido combinado exitosamente con una pasta de cemento Portland para formar un material compuesto o conocido como asbesto-cemento, la resistencia a la flexión del asbesto-cemento para contenidos de fibra de 8 a 16 por ciento en volumen es de 2 a 4 veces mayor que la de la matriz normal. Hay pocos países con yacimientos de asbesto en explotación, y en ellos las variedades de la mejor calidad se están agotando, aunado a esto, el cáncer del asbesto-cemento llamado asbestosis demanda un sustituto adecuado para el asbesto que bien pudiera ser la fibra de vidrio.

El uso de las fibras de vidrio en el concreto, principió en los años 50's, los trabajos de entonces estaban orientados al uso de varillas de fibra de vidrio con el objeto de substituir el acero de refuerzo convencional en elementos preforzados. Estos trabajos generalmente no tuvieron éxito por los problemas que se presentaron en los aditamentos para la sujeción. Por otra parte la fibra de vidrio comercial tipo E y vidrio E clasificado como vidrio borosilicato de bajo álcali progresivamente pierde resistencia en el medio alcalino como el que se presenta en el cemento Portland hidratado. Se han intentado varios métodos para vencer el ataque de los álcalis de las fibras de vidrio. En los últimos 16 años existen varias publicaciones rusas que tratan el uso de fibras de vidrio en concretos y cementos para producir productos reforzados con propósitos estructurales. Investigaciones en Rusia e Inglaterra han utilizado cemento con alto contenido de aluminio el cual tiene una matriz mucho menos alcalina. BIRYUKOVICH, GVOSEV y otros investigadores rusos; GOLDFEIN KLINK Y AGBIM utilizaron recubrimientos orgánicos para proteger a las fibras de los álcalis. UREV investigó a las fibras de vidrio con zirconia y estudió el porcentaje de destrucción de las fibras de vidrio en exposiciones prolongadas en concretos de cemento Portland. Recientes investigaciones en E. U. e Inglaterra han utilizado fibras de vidrio similares, en donde las resistencias en los álcalis es obtenido por cambios en las composiciones básicas del vidrio.

I.1.4 ESTADO DE DESARROLLO

En un estado inicial donde el método de proporcionamiento de los elementos para lograr una matriz de características de adherencia elevadas, está aún en desarrollo. Los métodos de mezclado, colocación y terminación han alcanzado un grado razonable de desarrollo, particularmente en pavimentos. Las dificultades que presenta al manejo del concreto reforzado con fibras de acero requiere de un planteamiento deliberado y el establecimiento de métodos para realizar un trabajo con sus características propias en relación a los métodos tradicionales en construcción de obras de concreto. Los métodos actuales de producción mecánica de concreto normal, pueden ser adecuados para producir concreto reforzado con fibras cortas dependiendo de los diversos factores involucrados en la mezcla.

También es de considerar la aparición de los concretos polimerizados, los cuales surgieron alrededor de la década de los 60's, fabricados a base de concreto y un plástico (polímero). Los resultados obtenidos con estos métodos fueron altamente satisfactorios.

Diversas instituciones dedicadas a la investigación hicieron una serie de propuestas experimentales para mejorar o diversificar las técnicas de preparación, tratando simultáneamente al aspecto de la optimización de los parámetros de procesamiento y formulación.

Algunos de estos productos ya se están aplicando en elementos para la construcción y en reparaciones muy específicas dando oportunidad de reducir los gastos de mantenimiento, ofreciendo simultáneamente una mayor versatilidad en el uso del concreto.

Este tipo de concretos polimerizados puede ubicarse dentro del área de los materiales polimerizados compuestos que ofrecen una enorme perspectiva de aplicación debido a la gran variedad de técnicas y de productos que pueden generar, basados en conocimientos fundamentales. Se puede delinear de antemano la arquitectura interna de las mismas, para que se manifiesten aquellas propiedades que los haga resaltar de entre los demás en lo que se refiere a su comportamiento. El conocimiento de las características particulares de estos concretos modificados, o al divulgación de sus cualidades, extenderán el uso del concreto hacia áreas no satisfactorias por el concreto común.

Finalmente, también se han realizado trabajos experimentales con otras fibras como la cerámica, fibras naturales como el algodón, sisal, yute, henequén usados en concreto; pero en la mayoría de los casos privan condiciones antieconómicas y además no satisfacen la condición de durabilidad a largo plazo del concreto.

1.1.5 HISTORIA

El uso de paja en adobes, de pelo de caballo en morteros, de madera y bambú en el concreto, son los inicios del refuerzo del concreto convencional de cemento Portland. Excluyendo el uso del asbesto, el cual se remonta a 2,500 años a.C. en Finlandia, ha sido en los últimos 15 años cuando se ha puesto atención en el uso de fibras sintéticas para mejorar las propiedades de los materiales tradicionalmente de construcción, dentro de los que se incluye yeso, pasta de cemento, mortero y concreto. El concepto de concreto como un material estructural homogéneo y resistente por la inclusión de fibras de acero fue considerado en 1910 por Porter. En 1911, Graham propuso el uso de fibras de acero en adición al refuerzo convencional para incrementar la resistencia y estabilidad del concreto reforzado. En 1920, se produjo una pasta de cemento reforzado con 40-50 por ciento en volumen de pequeñas fibras de acero de 0.3 mm. de diámetro y 2 mm. de longitud. Así mismo, Meischke Smith reconoció la necesidad de mejorar la forma y la importancia de la adherencia de la fibra. En 1933, Etheridge utilizó alambre torcido y con caras planas, más tarde se utilizaron fibras de diferentes tamaños y diámetros para mejorar la resistencia al agrietamiento y fractura del concreto.

Por último cabe hacer mención especial a Constantinesco (1943), quien mejoró las características de resistencia reclamadas entonces para el uso de las fibras de acero en forma lisa, corrugada o helicoidal ya que cualquier forma de ese esfuerzo no es muy diferente de lo establecido en la actualidad y que se reconoce como concreto reforzado con fibras.

La adición de fibras al concreto mejora las propiedades mecánicas del material como son: *resistencia a la flexión, resistencia al impacto y resistencia a la fatiga.*

Las fibras que más han sido estudiadas como refuerzo del concreto son: *acero, vidrio, polipropileno, nylon y rayón*

El concreto a lo largo de su historia, ha tomado las más variadas formas que la mente pueda imaginar, y no solo eso, si no además, ha sido un material de tal nobleza que permite ser elaborado no solo de los elementos que podemos llamar básicos, como lo son el cemento, la grava, la arena y el agua, si no además, permite una serie de materiales adicionales que mejoran o modifican sus características tanto en estado fresco como endurecido llamados aditivos y/o adicionantes.

En el caso que nos ocupa, una adición muy especial han sido las fibras de diferentes materiales, los cuales han demostrado, según su tipo, favorecer algunas propiedades del concreto, que sin ellas, difícilmente se podrían obtener a no ser de un proceso de diseño, elaboración, curado, etc., bastante cuidadoso.

De las primeras aplicaciones de las fibras en elementos constructivos tenemos los bloques de adobe, masa de barro y paja en forma de tabique secada al aire, de los cuales muchas casas y construcciones antiguas y aún recientes en nuestro país han tomado este elemento como pieza básica de su estructura.

Se tiene el conocimiento de uso de pelo de caballo para reforzar algunos tipos de mezclas como morteros y más recientemente, el uso de fibras de asbesto para reforzar mezclas de cemento.

Investigadores como James P. Romualdi, Gordon. B. Batson y James A. Mandel, en los reportes de sus investigaciones tituladas: "MECHANICS OF CRACK ARREST IN CONCRETE" y "DISTRIBUTED GLOSELY SPACED, SHORT LENGHTS OF WIRE REINFORCEMENT" a finales de los 50's, dieron las bases de la factibilidad de uso de fibras en el concreto.

A principios de los 60's se experimento en el uso de fibras de plásticos en concreto con y sin varillas de refuerzo estudiándose su comportamiento.

Simultáneamente a principios de los años 50's, tanto en los Estados Unidos, Reino Unido y Rusia, se experimentó en el uso de fibras de vidrio y su incorporación en la mezcla de concreto.

La mayor parte de los estudios realizados con fibras metálicas se han realizado en los Estados Unidos, en los que existe toda una metodología de diseño especialmente para diseño de pavimentos o pisos en concreto reforzado con este tipo de aditivo.

En relación al uso de fibras de vidrio, su principal aplicación ha sido en las diferentes y hoy muy utilizadas técnicas de concreto lanzado.

La mayor parte de los estudios que sobre el uso de fibras se han realizado, han tenido por objeto el estudio de sus propiedades con el fin específico de mejorar alguna de las características no satisfactorias o no deseables del concreto, como pueden ser su baja resistencia a la flexión o tensión y su proceso de contracción en el proceso de endurecimiento. Esta última, propiedad que produce agrietamientos en el concreto y como consecuencia final puede provocar oxidación en el acero de refuerzo y/o deterioramiento superficial de la masa de concreto.

I.1.6 INFORME

El desarrollo del CRF que comenzó hace tres décadas surgió de un concepto simple: el hecho de que la resistencia de un concreto cemento Portland quebradizo podría ser mejorado por medio del reforzamiento del compuesto con hilos delgados, espaciados lo menos posible unos de otros; (el término utilizado fue espaciamiento óptimo). Era evidente que la resistencia desaparecía al separarse dichos hilos (o fibras). Seguido de esto se observó que al ser óptimo el espaciamiento entre las fibras se logró una distribución más uniforme en las mismas. En vista de que las fibras para este propósito no eran fáciles de conseguir en el mercado, se tuvo que recurrir a otras fuentes de materiales tales como la fibra de acero y posteriormente de polipropileno. Las fibras utilizadas en un principio eran muy rugosas (0.15 a 0.25 mm.), y por consiguiente muy tiesas, lo cual ocasionaba problemas durante el mezclado. Este tipo de fibras no lograban distribuirse convenientemente en la mezcla de concreto y por lo tanto no se obtenía un adecuado espaciamiento de las mismas ni el resultado deseado, que en este caso es la resistencia a la primera ruptura, de todas formas cuando se llevaron a cabo mezclas en el laboratorio, con resultados satisfactorios hubo casi siempre, estadísticamente, una mejora en la resistencia, asociada con el comportamiento del compuesto después de la ruptura.

La incapacidad, tanto práctica como económicas, de producir un concreto CRF con alta concentración de fibra, desvió del interés de los investigadores en mejorar la resistencia del material antes de su primera ruptura, concentrándose así las investigaciones en el comportamiento posterior a la ruptura.

De mediados de los años 80, hasta nuestros días se han desarrollado muchos tipos de fibras nuevas, geometrías y técnicas de producción, que han permitido a los investigadores retomar el tema y mejorar la fuerza y la resistencia del material, así como también incrementar la concentración de la fibra y poder ésta ser utilizada en otros campos y aplicaciones.

A principios de 1986, la WEBSTER ENGINEERING ASSOCIATES, Inc., inició una investigación relativa a la efectividad de las fibras de polipropileno en la corrosión del acero de refuerzo en el concreto. Los resultados de esas primeras pruebas fueron informar en 1987 por WEBSTER y VONDRON en la Conferencia del Puente Internacional en Pittsburg, Pennsylvania y por Landau en la Conferencia del Instituto de Investigación en Hong Kong.

La WEBSTER ENGINEERING continuó el programa de pruebas. En agosto de 1988, WEBSTER y LANDA informaron acerca de los datos y resultados que podrían después ser de la continuación de estudios. Este informe concluyó en la Conferencia de Post-OWIC, Simposio sobre el Concreto y Estructuras en agosto de 1988 en Kuala Lumpur, Malasia. Este informe actual se presentó el 6 de diciembre de 1991, en la Conferencia Internacional sobre rehabilitación de las Estructuras de Concreto en Hong Kong. Se basó en un examen posterior del mismo prisma de concreto estudiado y producido en 1987 y se informó hasta 1988.

I.1.7 EL PAPEL DE LAS FIBRAS EN EL CONCRETO

Las fibras en el concreto tienen dos funciones importantes. La primera es evitar el agrietamiento por contracciones plásticas. La segunda es reducir la segregación de los componentes del concreto. Hay un número considerable de otras propiedades físicas las cuales son mejoradas por la aplicación de fibras al concreto. La reducción en la permeabilidad del concreto es un atributo de primordial importancia con respecto a la protección contra la corrosión. El alto índice de tenacidad, la cual es la habilidad del concreto para sostener una carga después de fractura inicial, que es también importante porque se refiere tanto al desconchamiento como a la cohesión continuada al esfuerzo de acero. Las fibras de polipropileno son consideradas como el mejor tipo de fibras para ser colocadas en el concreto.

El polipropileno es inerte y no es afectado ya sea por los ácidos o por los álcalis que se encuentran en el concreto. Estas no se degradarán en el concreto ni están sujeta a ninguna forma de corrosión. Es ligera con una gravedad específica de .91 y por consiguiente, hay un gran volumen de fibras para un peso determinado. Es resistente con una resistencia a la tensión por encima de 50 ksi. Es una fibra económica y por eso puede ser usada en cantidades adecuadas sin un gran gasto de dinero. Normalmente, para losas y otras obras planas de concreto horizontal, las fibras de polipropileno se encontró que son más satisfactorias en el uso que la malla de alambre u otros elementos de acero que se usan en el reforzamiento secundario y por estas razones pueden reemplazar a esas unidades de acero. Las fibras no pueden reemplazar al refuerzo original de acero. La dosificación normal de fibras de polipropileno es de .9 kilos por metro cúbico de concreto (1 1/2 libras por yarda cúbica). La longitud de la fibra por lo general es de 3/4 de pulgada (19 mm.). Los manojos fibrilados de fibras evitan el apelmamiento y durante el mezclado son separados en fibras individuales y llegan ser distribuidas con uniformidad en todo el concreto. Hay aproximadamente 7,100.00 fibras individuales por metro cúbico o aproximadamente 7 fibras por centímetro cúbico

1.2 TERMINOLOGÍA DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

A continuación se en lista la terminología relacionada con los distintos tipos y formas del CRF.

1.2.1 MATERIALES DE FIBRA

De acuerdo a la terminología descrita por el Instituto Americano del Concreto (ACI), existen tres categorías del CRF: CRFV para la fibra de vidrio; CRFSN para la fibra sintética ; CRFN para la fibra natural.

1.2.1.1 GEOMETRÍA DE LA FIBRA

Las fibras se producen en una gran variedad de formas, prismáticas redondas o rectangulares, monofilamentos o multifilamentos, fibras deformadas a todo lo largo o solo en sus extremos, en forma de redes intercaladas o bultos de fibras.

1.2.1.2 DIAMETRO EQUIVALENTE

Para las fibras que no son circulares ni prismáticas se requiere determinar el diámetro de una fibra individual como si esta en realidad lo fuera. A esto se le denomina diámetro equivalente, esto es necesario para poder determinar la cantidad de fibra en un volumen dado de esta, o bien el área de fibra hallada en una sección determinada del elemento. El diámetro equivalente de una fibra es el diámetro del círculo cuya área es la misma al área promedio de la sección de la fibra real.

1.2.1.3 PROPORCIÓN DEL ASPECTO DE LA FIBRA

Esta es una medida de una fibra individual y se obtiene dividiendo la longitud de la fibra sobre el diámetro equivalente de esta.

1.2.2 **DINER DE LA FIBRA**

Este término se aplica al CRFSN (fibra sintética), proviene de la industria textil y es definida como el peso en gramos, de 9000 metros de fibra, esta terminología no se aplica al CRFA (fibra de acero), a no ser de que se utilice para establecer comparaciones de densidad y geometría de distintos tipos de fibras. Si el DINER se utiliza para obtener un diámetro equivalente se hace por medio de la siguiente ecuación:

DONDE:

$f=0.0120$ por d en milímetros

$f=0.0005$ por d en pulgadas

D=denier de la fibra

G_e =gravedad específica de la fibra

$$d=f [D]^{1/2}$$

GE

1.2.2.1 **DINER DE PRE Y POST MEZCLADO**

Estos términos que aparecen en las especificaciones del material reflejan el hecho de que la forma de la fibra puede cambiar del momento en que estas son vacías en la mezcla de concreto, al momento de ser dispersadas dentro de la mezcla. Por ejemplo, algunas fibras sintéticas, de vidrio, naturales o de acero que se introducen a la mezcla de concreto en forma de fibras intercaladas, son en realidad grupos de fibras individuales. El DINER de post mezclado es pues el que se debe considerar al momento de realizar cualquier tipo de cálculo y que este comprenda el número y la distribución de fibras individuales dentro de una mezcla en particular.

1.2.2.2 CANTIDAD DE FIBRA Y SUPERFICIE

Cantidad de fibra (CF) y superficie específica (SE) son el número de fibras en una unidad de volumen de concreto y el área de la superficie de fibra en una unidad de volumen de concreto, respectivamente. Estos parámetros son de gran utilidad en el estudio de las mecánicas de comportamiento del CRF.

1.2.2.3 FUERZA Y RESISTENCIA

Aunque a simple vista los términos fuerza y resistencia tienen relación con el comportamiento mecánico de los materiales constructivos, por lo regular estos son mal aplicados a los componentes relacionados con el CRF. El hecho es que para cualquier compuesto dado de CRF, o cualquier tipo de técnica de medición, tal como la tensión directa, flexión o compresión, existe una gran diversidad de criterios de diseño que en ocasiones se presentan a confusión. La fuerza y la resistencia antes y después de la ruptura son de gran utilidad al analizar los compuestos quebradizos. Aunque debido a la utilización de la máquina de pruebas, así como a la formulación misma del CRF y al tamaño y forma del espécimen de prueba, es muy difícil determinar el momento en que se lleva a cabo la ruptura del mismo. Esto hace muy difícil establecer comparaciones entre distintos laboratorios o formulaciones; pero si reconocemos que no es tanto la fuerza y resistencia, sino la confiabilidad de permanencia de las mismas lo que le da importancia, estas pequeñas diferencias de comportamiento se vuelven menos significantes al establecer consideraciones de diseño.

Por medio de estudios hechos con anterioridad se logró determinar que la llamada resistencia del CRF no se veía muy afectada al variar las cantidades de fibra en el compuesto, cosa que si sucedía con la denominada fuerza del CRF. Así pues, es un hecho el que tanto para altas como para bajas cantidades de fibra en el CRF se obtiene una misma resistencia mecánica, es entonces, como ya se ha mencionado, la confiabilidad de permanencia de la fuerza y resistencia de antes y después del momento de la ruptura, bajo criterios razonables, la que es de gran utilidad al momento de establecer parámetros de análisis y de diseño y que hacen del CRF un material útil y atractivo.

Uno puede pues concluir, que no tanto la fuerza (energía), ni la resistencia (esfuerzo de fatiga), lo más representativo del comportamiento del CRF si no su comportamiento de confiabilidad carga deflexión antes y después de la ruptura.

El único problema es que, por un lado la respuesta carga deflexión se aplica a ejemplos específicos o prototipos de prueba, y por otro que el concepto resistencia es un esfuerzo y no una carga, y la fuerza es energía y no una deflexión propiamente dicha.

I.3 MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

Por mucho el material más comúnmente utilizado para la elaboración del CRF es el cemento Portland.

Algunos materiales apropiados para aplicaciones refractorias contienen cemento alto en aluminio y materiales con minerologías y procesos de mezclado especiales, y que han gozado de una gran aceptación.

Otro tipo de cementos Portland, incluyen materiales y pequeñas partículas densificadas para uso de cemento y morteros, y permiten mezclas de gran resistencia capaces de absorber grandes cantidades de energía elástica de tensión en comparación con las formulaciones tradicionales de cemento Portland.

Conforme a investigaciones recientes, se ha logrado confirmar que una mayor eficacia en la fibra da como resultado un aumento en el comportamiento del concreto, en cada uno de estos concretos especiales se utiliza muy poca cantidad de agua durante los procesos de producción y curado, dando como resultado una microestructura uniforme de baja porosidad, cosa que no sucede con el cemento Portland tradicional, muchos de los problemas relacionados con el mezclar fibras con compuestos concentrados y de baja cantidad de agua, son superados al momento en que estos se revuelven para formar una sola mezcla, por medio de un proceso especial a presión, estos procesos también han demostrado mejorar la eficiencia de la fibra, aún en las que presentan un aspecto de proporción bajo.

Existen otros tipos de formulaciones de cemento polímeros modificados que actualmente reciben mucha importancia en relación al CRF, tal es el caso del concreto o mortero cemento-polímero, que es una mezcla de cemento Portland y materiales de polímeros; un concreto o mortero con impregnaciones de polímeros, que es un concreto a base de cemento Portland tradicional a cuya estructura porosa se le impregnan materiales polímeros después del proceso de curado.

Finalmente un concreto cemento Portland que se compone solamente de aire y fibra, denominado concreto celular reforzado con fibra (CCRF), está siendo actualmente desarrollado. El material utiliza cemento Portland y un sistema de espacios de aire que se expanden durante el proceso de manufacturación para formar un concreto celular, (o concreto celular), en donde el sistema de espacios de aire actúa como el agregado de la mezcla, un tipo de fibra sintética de polipropileno actúa como el refuerzo del material.

El producto resultante es relativamente ligero, aproximadamente (640 kg/m^3), y goza de las características de confiabilidad de fuerza y resistencia, propias de un material reforzado con fibra (CRF).

A continuación se muestra una tabla comparativa con las propiedades principales de distintos materiales hechos con concreto cemento Portland:

MATERIAL BASE	RESISTENCIA A LA COMPRESION (Kg/cm ²)	MODULO DE RUPTURA (Kg/cm ²)	MODULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm ²)
CONCRETO CEMENTO PORTLAND	210-900	28-60	200000-300000
CONCRETO DENSIFICADO	1800-2200	150-200	250000-350000
CCRF	50-60	4-6	10000-11000

1.3.1 CONCRETRACION DE VOLUMEN DE LA FIBRA Y TECNICAS DE PRODUCCION

La concentración de volúmenes de fibra dentro de una cantidad de compuesto determinado puede ir de una relativamente alta, a una relativamente baja; se considera como alta concentración la que se encuentra en el rango de 3 y 12 por ciento; como moderada de 1 a 3 por ciento; esto basado en el volumen total de concreto producido. La concentración de fibra normalmente afecta al tipo de tecnología a utilizarse par un producto de CRF en particular.

Además de la extensa variedad de tipos de fibra , de compuestos de concreto y de tecnologías de producción útiles para el mezclado y fabricación del CRF, existe también una consiguiente diversidad de propiedades del material resultante que apropiadas para un sin fin de aplicaciones.

I.3.2 CONCRETO

El concreto en un material de características pétreas, resultado de combinar en proporciones apropiadas cemento, agregados y agua. La pasta de cemento es el aglutinante que une a los agregados entre sí para formar lo que se conoce como concreto simple.

El concreto simple, o sin refuerzo, es resistente a la compresión pero baja resistencia a la tensión. Un buen concreto debe tener suficiente resistencia a compresión para soportar las cargas que se le apliquen, debe ser capaz de soportar las condiciones de exposición a que estará sometido y producirse a bajo costo en comparación con otros materiales.

La combinación de concreto simple con acero de refuerzo constituye el concreto reforzado, dicho acero proporciona propiedades de resistencia a la tensión al concreto; así mismo, se utiliza el acero para aumentar su resistencia a la compresión o para reducir las deformaciones debidas a las cargas.

I.3.3 CEMENTO

Todos los cementos Portland se comportan de modo similar respecto a la propiedad principal que es proporcionar adhesión y cohesividad lo que da como resultado la resistencia a la compresión del concreto. Existen otras propiedades del concreto tales como: refractarias, antibacterianas y de durabilidad ante medios agresivos, dichas propiedades se pueden obtener por medio del uso de cementos aluminosos, sobresulfatados, antibacterianos, puzolánicos u otros cementos para usos especiales.

I.3.4 AGREGADOS

El agregado en el concreto ocupa por lo menos tres cuartas partes de su volumen por lo cual es importante. El agregado es más barato que el cemento y resulta más económico poner en la mezcla la cantidad máxima de agregado que sea posible, ya que además de económico le proporciona al concreto resistencia, estabilidad de volumen y mayor durabilidad que la pasta de cemento sola. Debido a la importancia del agregado debe hacerse notar su interacción con las fibras al elaborar el concreto reforzado con ellas.

La presencia del agregado crea fricción entre sus partículas y las fibras, causando distorsión y aglomeración de la fibra durante el proceso de mezclado por lo que se debe tener un buen control del volumen fibra-agregado.

I.3.5 FIBRAS

I.3.5.1 FIBRAS DISPONIBLES

Un amplio rango de fibras están disponibles, desde las muy caras (fibras de carbón) hasta las más baratas como son las fibras textiles naturales. A continuación se en listan en los siguiente grupos:

1.- Minerales

vidrio y asbesto

2.- Orgánicas

nylon, polipropileno y polietileno, algodón, henequén y carbón

3.-Metálicas

acero, aluminio, cobre, etc.

Solamente cuatro materiales en la actualidad son de uso común como refuerzo del concreto: *asbesto, vidrio, acero y polipropileno*; sus propiedades se proporcionan en la Tabla 1.

TIPO	PESO ESPECIFICO	TAMARO TIPICO LONGITUD μ ms	DIAMETRO mm	RESISTENCIA A LA TENSION Kg/cm^2	MODULO ELASTICO Kg/cm^2	TEMPERATURA A LA CUAL SE PierDE RESISTENCIA $^{\circ}\text{C}$
Chrysóle Asbesto "blanco" (el más abundante)	2.6	0.8 a 19 mismo hasta 100	0.0002 hasta 0.02	3.15 (31620)	164 1.67E-06	300 a 1450
Crocidolite Asbesto azul (menos abundante)	3.4	9.8 a 25 mismo hasta 100	0.0001 hasta 0.02	3.5 (35700)	198 1.99E-06	300 a 1100
Nylon	1.14	limitado	>0.004	0.78 (7752)	3.7 (37740)	Progresivamente y se Fundes a 230
Vidrio	2.7	limitado lo más usual de 25 a 50	0.009 hasta 0.02	2.1 a 2.8	77 (785400)	800
Acero	7.8	limitado lo más usual de 25 a 50	0.005 hasta 0.5	1 a 3.5 (10200 a 35700)	210 2.10E-06	300 a 750
Polipropileno	0.9	limitado lo más usual de 25 a 50	>0.004	0.52 (5304)	6.3 (64260)	Progresivamente y se Fundes a 160
Carbón	1.9	75 a 150	0.003 hasta 0.009	1.4 a 3.1 (14280 a 31620)	245 a 455 2.4 a 4.6E8	1200
Henequén	1.5	1200	0.007 hasta 0.047	0.8 (8160)		
Pasta de cemento endurecido	2			4 (41)	21 (214000)	

De la tabla anterior se puede hacer notar las siguientes diferencias: las fibras más cortas en longitud son las de asbesto, las de más bajo módulo de elasticidad son las de polipropileno y el nylon, además el polipropileno tiene la más baja resistencia al incrementarse la temperatura. Respecto al asbesto parece ser el material ideal pero hay problemas respecto a su uso, ya que implica riesgo al extraerlo, a parte del alto costo de procesamiento para poder utilizar las propiedades físicas; por lo que se refiere al vidrio y el acero, los adelantos tecnológicos se están enfocando al desarrollo de esas fibras como esfuerzo del concreto.

Las fibras de polipropileno también han sido introducidas dentro de la mezcla de concreto de la misma forma. En los Estados Unidos ha sido posible colocar concreto con fibras por medio de la técnica de concreto lanzado. Las fibras de acero pueden ser orientadas en el concreto fresco por medio de vibración utilizando un campo magnético u otras técnicas más simples.

Utilizando el método de enrollamiento es posible introducir más de 0.15 de fracción de volumen de fibras en el concreto. El proceso de esparcimiento, el cual produce arreglo de las fibras en dos direcciones, permite un exceso de 0.10 de volumen de fibra. El premezclado de la fibra en el concreto antes de su colocación en el molde o cimbra, solo permite un incremento del 0.05 de volumen de fibras, en la mayoría de los casos de las fibras de acero la fracción de volumen de fibra que más se puede obtener es de 0.03, con grandes dificultades.

Existen varios parámetros para el control del contenido de fibra que debe ser introducido en el concreto, el más importante de ellos es la relación aspecto de la fibra, entre otros parámetros se puede citar la reología de la matriz de concreto. Las posibilidades del concreto endurecido reforzado con fibras dependen significativamente de la porosidad y tienen gran importancia de la relación agua/cemento utilizada en la elaboración del concreto. Se puede obtener un control aceptable de la relación agua/cemento por medio de aditivos fluidificantes.

En el caso de las fibras de acero, la cantidad de "alambres" para la cual la mezcla tiende a hacerse "bolas" depende mucho de la relación aspecto (longitud/diámetro) del alambre y de las proporciones de la mezcla. La tendencia a hacerse "bolas" se puede describir como la formación de pequeños "terrones" de fibras sin que exista mortero entre éstas, llegando a ocurrir aun cuando se agreguen las fibras de manera individual de la mezcla.

El tamaño máximo del agregado y el contenido de cemento son otros factores que pueden afectar la posible concentración de fibras o formación de "bolas". En general mezclas más ricas o más húmedas con poco agregado de tamaño máximo pueden permitir la inclusión de un contenido más alto de fibra. Por lo tanto, si se requiere obtener un concreto consistente, el diseño de mezcla y control cuidadoso y la selección de un tamaño adecuado de la fibra así, como la cantidad de éstas son factores esenciales que deben considerarse para lograr una distribución uniforme.

En la elaboración de grandes volúmenes de concreto con fibras de acero, se han utilizado muchos tipos de mezcladoras como son de tambor, de turbina, para mortero y del tipo batidora, la más común de las técnicas es mezclar en seco inicialmente la arena, el agregado grueso y la fibra. Este procedimiento rompe los "terrones" de fibra y los distribuye uniformemente por medio de los agregados, finalmente se añade el cemento y el agua.

I.4 COMENTARIO DE DISTINTAS FIBRAS

I.4.1 ASBESTO

Hasta hace 10 años prácticamente todos los materiales de cemento reforzado con fibras, fueron producidos con fibras de asbesto como refuerzo y este material de fibra mantiene la supremacía, aún cuando particularmente en unos cuantos años se ha observado una intensa investigación enfocada a encontrar un sustituto adecuado de las fibras de asbesto.

Existe grande y extenso consumo de esta materia prima por la industria del asbesto-cemento (del orden de 20 millones de toneladas al año). Y es de comprender que es necesario encontrar un sustituto de fibra previsible en el futuro, porque los recursos de asbesto de la tierra no son inagotables y además porque recientes investigaciones de la industria de la medicina han concluido por el trabajo con asbesto ocasiona riesgo a la salud.

De esta forma muy grande intereses económicos están involucrados en la búsqueda de un sustituto adecuado de la fibra, aunque el problema no es fácil, primero porque la naturaleza ha dado a los asbestos ciertas cualidades especiales que los hacen excepcionalmente adecuado para esto propósito específico, y no todas esas cualidades están representadas en otros tipos de fibras que podrían entrar en consideración.

Los asbestos tienen una alta resistencia química y buenas propiedades mecánicas, principalmente alta resistencia a la tensión y módulo de elasticidad (3.2×10^4 y 3.5×10^4 km/cm² respectivamente para una fibra de aproximadamente 3.37 de gravedad específica para las cantidades de fibra que normalmente se usan). Además las fibras tienen una alta ductibilidad, por lo que ellas pueden resistir un pre-tratamiento pesado, en el caso de un machado o laminado con martillo y un tratamiento mecánico pesado durante la fibrilación y mezclado con el cemento. Debido a su estructura cristalina, las fibras muestran una clara tendencia a partirse siempre en fibras más delgadas y particularmente en cohesivos paquetes de fibras paralelas, con el tratamiento mecánico mencionado, de manera sistemática, sin propiciar un marañamiento del material o algún acortamiento significativo en la longitud de la fibra.

Así con el tratamiento mecánico, comparativamente sencillo, las fibras de asbesto pueden ser fibriladas a tal grado que, por ejemplo, es posible separar las fibras individuales con una suspensión de agua, diluyendo la suspensión por medio de un agitado mecánico constante. La habilidad de las partículas de cemento de envolver a las fibras y a los pequeños paquetes de fibras, permite de esta forma un anclaje total de refuerzo produciendo una estructura perfecta en la cual la variación de espaciamiento de las fibras son mínimas de un punto a otro.

Cuando el exceso de agua es removida y las suspensiones son muy delgadas, la segregación no tiene lugar prácticamente en la construcción del material. De esta forma el mezclado perfecto antes mencionado de los componentes se puede preservar de suspensiones con contenidos de agua de, por ejemplo, aproximadamente 90% a un producto final con un contenido de agua de aproximadamente 20%.

La razón de este fenómeno, considerado como una de las características más valiosas de los asbestos en este contexto, no se conoce con certeza. Se le ha denominado como la flotación de los asbestos por el cemento y los polvos de otros materiales, fenómeno que se ha atribuido a las fuerzas especiales de adhesión en los componentes; aunque también es razonable suponer que es precisamente el resultado de la intensa división del material de fibra (en la mezcla terminada muchas de las fibras tienen un diámetro mucho menor que 1 μ) por lo cual aún en la construcción de láminas muy delgadas con fibras de asbesto se usan las técnicas de fabricación de papel, constituyendo el material un filtro que evita que se eliminen la mayoría de las partículas de cemento.

Finalmente se hace notar, en relación a las muchas propiedades mecánicas valiosas, las fibras de asbesto son actualmente un material de fibra completamente barato, aunque los precios se han elevado en los últimos años, particularmente por las fibras de cualidades y resistencias más adecuadas, algunas de las cuales son difíciles de obtener en la actualidad, aunque con técnicas mejoradas y constante investigación, la industria del asbesto-cemento ha aprendido a explotar la escasez y particularmente las cualidades de las fibras cortas, razón por la cual ha hecho posible mantener los precios del asbesto-cemento a un nivel razonable.

1.4.2 CELULOSA

La fibra de las celulosas tiene una resistencia a la tensión y módulo de la elasticidad considerablemente bajas con respecto a los asbestos (0.3×10^4 kg/cm² y 0.1×10^6 km/cm²) respectivamente para un fibra de densidad aproximada de 1.2. Además las fibras son higroscópicas y sus resistencias disminuyen con la absorción de agua, las dimensiones de las fibras no son estables bajo variaciones de contenido de humedad, deteriorándose las fibras si se mantienen por períodos largos de humedad. Finalmente las fibras de celulosa no pueden tolerar temperaturas arriba de 100-12° C.

En vista de esto las fibras de celulosa parece que no se prestan a impartir por sí mismas como un sustituto adecuado de las fibras de asbesto en este contexto, aunque se deben mencionar aquí que debido a que ellas son el único material de fibra que hasta ahora se ha usado a un nivel razonable como material de refuerzo de cemento Portland de acuerdo con los mismos principios de las fibras de asbesto.

Aún tomado en cuenta la muy baja resistencia de la fibra, la celulosa es un material de fibra económico y debido a la capacidad de las fibras a anclarse directamente entre sí durante la producción de por ejemplo un hoja de papel ordinario, esta propiedad hace posible lograr una alta eficiencia de las fibras en un material compuesto, aún cuando se use un material inorgánico como matriz que solo proporcionará una modesta adherencia entre la matriz y la fibra.

Con el fin de proporcionar un producto final con propiedades resistentes adecuadas es necesario usar una cantidad mayor de refuerzo de fibra celulosa que las usadas con asbesto ($V_f=0.15-0.20$ comparado con $0.06 - 0.09$ de asbesto); esto es razonable en vista de su precio económico.

Por varios años a la fecha, la industria del papel ha trabajado en el mejoramiento de este material, primero con la impregnación y recubrimiento de las fibras con materiales polioméricos, como la melamina y el Fenol-Formoldeído, a fin de producir un papel resistente al agua con mayor estabilidad dimensional que la que se obtiene normalmente sin impregnación.

Con el uso de la experiencia obtenida en la industria del papel no es probable que se pueda competir con los materiales de cemento y fibra en ventajosas propiedades mecánicas, la matriz del material puede ser Cemento Portland ordinario o, dando un paso más usar polvo de cuarzo ordinario o inactivo con la misma finura que la del cemento y la adherencia del material (tanto las mismas partículas de la matriz, la matriz y las fibras) por medio de un pegamento polimérico mezclado en la suspensión.

1.4.3 FIBRAS MINERALES SINTÉTICAS

Las fibras de minerales sintéticas (como la fibra de vidrio y los diferentes tipos de lana mineral) se pueden producir con muy altas propiedades resistentes y muy buenas propiedades elásticas (aproximadamente de 2×10^4 kg/cm² y 0.71×10^6 kg/cm² respectivamente para una fibra de una densidad aproximada de 2.6). Las fibras normalmente no son resistentes a los álcalis de esta forma son más adecuadas como material de refuerzo de mortero para repellos y enlucidos con cemento de altos contenidos de aluminio a falta de fibras de vidrio especiales que resisten adecuadamente el ataque a los álcalis del cemento Portland ordinario.

Existen dos métodos principales de producción de fibras minerales sintéticas: hilamiento de una sola fibra e hilamento masivo o soplado, el primer método produce material de fibra más resistente y difícil de cortar aunque también es más caro y considerablemente más costoso que la fibra de asbesto.

En los últimos años en Inglaterra se han hecho intensos esfuerzos para encontrar un método adecuado de producción para la fabricación de materiales de cemento y fibra, usando plataformas cortadoras hechas en principio para las fibras de un solo hilo como material de refuerzo y cemento Portland o yeso como material de matriz. Esta ha originado materiales compuestos con una elevada resistencia última y una adecuada ductilidad y alargamiento a la ruptura aún con contenidos de fibra considerablemente bajos ($V_f \sim 0.03$) que los que normalmente se usan en asbesto-cemento.

Sin embargo para cargas superiores al límite elástico el comportamiento de esos materiales difiere un poco de los materiales ordinarios de asbesto cemento, lo cual parece indicar que ellos aún no han llegado a un estado de desarrollo que garantice su venta en el mercado para todos los usos en los cuales el asbesto cemento se usa en la actualidad.

Los otros tipos de fibras sintéticas (fibras sopladas o hilo masivo) se producen principalmente para propósitos de aislamiento. Las fibras son comparativamente cortas (l_f 1-10mm d_f 5 μ), sus propiedades resistentes no son buenas y totalmente uniformes, como las fibras de un solo hilo ($f_u \sim 1.5 \times 10^4$ kg/cm² para una fibra de densidad de 2.5 - 3.0) aunque el material de fibra representa una gran economía que garantiza la producción masiva. En consecuencia es indudable que este material de refuerzo es preferible en relación a las fibras de un solo hilo si se contara con métodos adecuados de producción para materiales de cemento y fibra.

Son baratas las fibras de lana mineral que generalmente vienen en forma de un producto de lana enredada, que no se puede fibrizar fácilmente. El material no puede tolerar los métodos mecánicos usados en el tratamiento previo y al proceso de mezclado por la industria del asbesto cemento y al papel. Mientras que las fibras de asbesto celulosa si pueden liberarse una de la otra y separarse en una suspensión de agua, por ejemplo con la simple dilución durante el procesamiento mecánico. Las fibras de lana mineral muestran una tendencia definitiva a enredarse sistemáticamente en nudos muy apretados de fibra, impidiendo dichos nudos que penetren las partículas de cemento, obstruyendo naturalmente al mejoramiento de las propiedades resistentes del producto. Por el contrario la distribución irregular de las fibras en la matriz y como resultado de esto (una gran parte no estaría totalmente anclado y grandes áreas del material de matriz estaría sobreforzado) se puede ocasionar un producto final con pobres propiedades mecánicas como si se tratara de un material no reforzado.

Un producto especial de fibra de vidrio (llamado material de recubrimiento) adonde las fibras son manufacturadas por medio de un procedimiento no muy elaborado con respecto a las fibras de un solo hilo, es altamente adecuado para la construcción de láminas, paneles o tubos si se dispusiera de cantidades suficientes de fibra y a precios razonables.

El material viene en forma de tramos delgados de fieltro (50-100 g/cm²) compuesto de simples fibras largas con diámetros normales de 10 μ), dispuestas aleatoriamente en el plano del fieltro y ligeramente fijadas con un pegamento orgánico. Este material se puede producir con una abertura tal y una distribución uniforme de las fibras que es posible que sin un pre-tratamiento adicional, llenar el volumen de los poros con una lechada de cemento a pasta mediante un simple proceso de impregnación. En esta forma todos los problemas que acarrea la abertura del material se evitan de todo el refuerzo en el producto terminado.

1.4.4 FIBRAS PLÁSTICAS

Las fibras plásticas particularmente más baratas (las llamadas fibras partidas) se usan algunas veces para reforzar concreto y si fuera desarrollada una técnica adecuada, probablemente podrían ser usadas para reforzar concreto cemento Portland o materiales similares.

Las fibras tienen resistencia a la tensión y un módulo de elasticidad considerablemente muy bajo ($f_u = 0.5 \times 10^4$ kg/cm² $E_f = 0.05 \times 10^6$ kg/cm² para una fibra de 0.9 de densidad). El alargamiento de ruptura de estas fibras normalmente es mucho mayor que la requerida para este propósito aunque esto se puede reducir algo y al mismo tiempo mejorar la resistencia de la fibra con una ampliación del proceso de estirado en frío que se usa en la producción del material de fibra (fibras de alta tenacidad).

La adhesión fibra/cemento indudablemente son más que en el caso de la mayoría de los otros tipos de fibras, debido a que las propiedades de la superficie de las fibras y porque la razón de Poisson es relativamente alta para plásticos ($\nu_f = 0.4-0.5$ contra 0.2-0.3 para la mayoría de los otros tipos de fibras) en consecuencia es necesario usar longitudes comparativamente mayores en este caso.

Como las fibras no son afectadas por los álcalis del concreto y además tienen una alta resistencia y una baja gravedad específica, son comparativamente económicas y es probable que este material algún día encuentre aplicaciones considerablemente mayores como material para reforzar cemento que en la actualidad, en que aún existen serios problemas por superar.

Aún con los métodos de mezclado comparativamente simples la adición de las fibras tanto el concreto como el cemento Portland ordinario, propician mejoramientos importantes en la resistencia al impacto y la tenacidad a la fractura de ambos materiales, aunque no parecen incrementar significativamente la resistencia a la tensión y la flexión de los materiales que se han ensayado con este tipo de refuerzo. Por el contrario si las fibras no son mezcladas con mucho cuidado para asegurar una distribución uniforme en toda la masa del material, el producto final puede, como se mencionó al principio tener una resistencia muy baja como si se hubiera dejado sin refuerzo.

1.4.5 FIBRAS DE ACERO

Se han hecho algunos usos, de las fibras de acero como refuerzo en el concreto, aunque es improbable, que ellas lleguen a ser de gran interés práctico como sustituto de los asbestos para reforzar cemento Portland debido a sus costos elevados.

Las fibras son surtidas en diámetro de aproximadamente 50 a 25 μ en longitudes de 3 a 50 mm. La cantidad puede ser agregada al concreto y distribuido uniformemente en el material, dependiendo en gran parte de la relación de aspecto que se adopte. Para la relación de aspecto (l/d) frecuentemente se usa valores de aproximadamente 100-200 y un contenido de fibra estimada en base al peso en total del concreto de aproximadamente (Vf=0.002-0.010). Para relaciones de aspecto l/d más bajos, el contenido de fibra puede ser aumentado, aunque debido a lo reducido de la longitud de anclaje, no se obtiene un gran mejoramiento de las propiedades resistentes.

Las fibras de acero tienen una alta y favorable resistencia a la tensión ($f_u = 2 \times 10^4$ l/cm^2 y 3×10^4 kg/cm^2 y $E_f = 2.1 \times 10^6$ kg/cm^2 para una fibra de densidad 7.8) aunque con las fibras comparativamente cortas que tienen que ser usadas, es de dudar si se pueda lograr la suficiente adherencia para el uso total de las altas resistencias de las fibras. En fallas por tensión o flexión de concreto o mortero reforzado con fibras de acero la ruptura siempre ocurre prácticamente como una consecuencia de que las fibras son jaladas, y no por ruptura de tensión de las fibras. Las fibras son surtidas como alambre estirado en frío y posiblemente con un recubrimiento de latón (de aproximadamente 2 μ de espesor). El recubrimiento de las fibras ocasiona un cierto mejoramiento de la adhesión del cemento y hasta cierto punto ayudar además a proteger a las fibras de la corrosión, aunque el peligro de ese ataque a esos alambres de refuerzo muy delgados es un factor que se debe tomar en consideración. Se podía preferir el acero inoxidable en casos especiales.

I.5 MATRICES DE MATERIALES FRÁGILES, REFORZADOS CON FIBRA

Con respecto a los problemas relacionados con la producción de materiales reforzados con fibra, estos se pueden clasificar en dos grandes grupos de acuerdo al tipo de material usado en la matriz. En el primer grupo el alargamiento a la ruptura del material de matriz es del mismo orden de magnitud que el alargamiento de la ruptura de las fibras, en tanto que en el segundo grupo las deformaciones del material son más pequeñas.

El material de matriz en el primer grupo normalmente comprende el uso de un material orgánico polimérico, por ejemplo: resinas epoxy, poliéster, fenolio o resina de melamina, en tanto que el segundo grupo se encuentra comprendido el material de cemento inorgánico (cemento portland, cemento de alto contenido de aluminio, yeso, silicato calcio mortero de cemento, concreto). Se han descuidado dos grupos menores de materiales reforzados con fibras y que son los metales reforzados con fibra y los materiales de cerámica: ya que ellos son aún de poco interés práctico en relación con el primer grupo enunciado.

Es característico de los materiales compuesto del primer grupo, que requieren normalmente un contenido de fibra alto ($V_f=0.2-0.8$) y por otra parte se han ensayado sistemáticamente muchos tipos de orientación que pretenden alcanzar la máxima eficiencia de el refuerzo en las direcciones deseadas. Tanto la fibra como los materiales de matriz son en muchos casos muy costosos y el producto final normalmente se manufactura para estructuras especiales, a donde hasta el momento se desconocen las combinaciones de las propiedades del material que se requieren como son resistencia ordinaria, endurecimiento, peso ligero, alta resistencia a la corrosión.

Los materiales del segundo grupo por otra parte son de una y otra manera material de construcción, por ejemplo: El material debe producirse en grandes cantidades y a bajo costo y que además está sujeto frecuentemente a requerimientos rigurosos en cuanto a las propiedades constantes del material en periodos de por ejemplo 50 años o más. Se aprovechan las posibles economías de los materiales básicos manteniendo contenidos de fibra lo más baja posible ($V_f=0.01-0.20$). De esta manera muchas de las propiedades de los materiales de los productos finales no varían significativamente con relación a la propiedades del material de matriz y las fibras son en principio agregados a la matriz con el objeto de remediar ciertas propiedades no convenientes.

Existen varios problemas técnicos en la producción de los elementos comprendidos en el primer grupo. Se han desarrollado varios métodos para la manufacturación de estos materiales compuestos, como son, laminación, esprayado, bobinado de filamentos, moldeamiento en pastas, etc., proporcionando todas ellas un material sólido y bien constituido con contenidos de aire bajos y una distribución suficientemente uniforme de la fibras en la matriz.

En el segundo grupo, por otra parte, frecuentemente se encuentran dificultades. Como solo se han desarrollado uno cuantos métodos para la producción de este tipo de materiales, por una parte, se ha encontrado que un método que es adecuado para una combinación de fibras y cemento, frecuentemente es inadecuado para otras.

Unos pocos tipos de fibras (como las fibras de asbesto y en cierto grado la fibra de la celulosa) se pueden mezclar frecuentemente por medio de distintos métodos de producción con cemento Portland, yeso, silicato cálcico y similares. Sin embargo, el problema se complica con otras combinaciones (en la mayoría de los casos) que aún no se han resuelto, y la mayoría de los materiales de este tipo que hasta ahora han salido a la luz del día se deben considerar como productos experimentales o como un representación de una solución temporal del problema. En muchos casos solamente se alcanzan, por el contrario, una utilización muy baja de las propiedades resistentes del refuerzo en el material compuesto, que se debe en primer lugar a la gran variación de la concentración de la fibra de una zona a otra dentro del material y al pobre anclaje de las fibras.

1.5.1 MATRICES ORGANICAS E INORGANICAS

Existen varias razones por las cuales los materiales de matriz orgánica son mucho más adecuadas para ser reforzadas con fibras que los materiales de matriz inorgánica.

1.- Antes del curado (aunque probablemente después de un calentamiento adecuado) los materiales orgánicos tienen la forma de un fluido de baja viscosidad que puede penetrar en el interior y desplazar todo el aire, aún en los paquetes de fibra más densamente empacadas, donde la distancia entre las superficies longitudinales de las fibras pueden ser del orden de 1μ ($1\mu = 1/1000\text{mm}$) o menor, y en donde cada paquete de fibras contiene cientos o miles de fibras individuales. Los materiales de cemento inorgánico, por otra parte, vienen en forma de polvo con un tamaño máximo de grano de aproximadamente 100μ .

En la mayoría de los casos es necesario dar un tratamiento previo (Fibrillar) al material de fibra a fin de abrirla y separar las fibras individuales suficientemente con el fin de permitir que el concreto penetre completamente en la superficie de todas las fibras. En muchos casos es muy difícil de llevar un tratamiento sistemático previo en las fibras sin evitar la destrucción de éstas.

2.- Cuando los materiales se han reforzado, la matriz orgánica puede endurecerse directamente, en tanto que en la mayoría de los cementos inorgánicos son de materiales hidráulicos, los cuales son generalmente premezclados con exceso de agua, la cual se debe remover antes de que pueda empezar el endurecimiento. Especialmente en el caso de fibras gruesas o grandes la remoción de esta agua puede ocasionar un cierto grado de segregación, perjudicando de esta forma el material en sus propiedades.

3.- Se obtiene un alta adherencia entre la matriz y las fibras en el caso de materiales orgánicos, que en el caso de materiales inorgánicos (Tcf. org. ~ 10 Tcf, inorg.) siendo mucho mayor el peligro de una falla prematura por jalado de las fibras cortas de refuerzo en el último grupo.

4.- En casos en los cuales el alargamiento a la ruptura de la matriz es considerablemente menor que el de las fibras, la efectividad del refuerzo, se puede valorar considerablemente, si al agrietarse la matriz, las fibras no pueden tomar o absorber la sobrecarga en zonas sujetas a esfuerzos de tensión sin ser dañadas.

El bajo contenido de fibra, la gran variación de las densidades de las fibras, así como su orientación de una zona a otra dentro del material, aumentarán el peligro de daño al refuerzo, debido a que las sobre reforzadas tendrán un efecto de falla potencial en el resto de la sección transversal. Este peligro raramente se encuentra en el primer grupo de materiales debido a que la matriz orgánica tiene un amplio alargamiento a la ruptura. Pero aún cuando éste se reduce significativamente en el caso de una fuerte contracción durante el endurecimiento, significa que existen pocas probabilidades de perjudicar con peligro el refuerzo en fibras, debido a la gran cantidad de refuerzo usado y además porque en este grupo de materiales fácilmente, se alcanza una distribución adecuada de las fibras en la matriz.

Por otra parte, en el caso de materiales de matriz inorgánica existe un gran peligro de daño, debido a que el alargamiento a la ruptura del concreto es considerablemente más pequeña que la de las fibras (ϵ^c 0.1 ~ ϵ^f o menor) debido a los contenidos de fibra muy bajas que se requieren y al hecho de que es frecuentemente difícil lograr una perfecta distribución de las fibras y una suficiente adherencia entre los componente.

5.- Finalmente el endurecimiento de los materiales de matriz orgánica son en su mayoría químicamente inactivos, en tanto que en la mayoría de los materiales inorgánicos existe reacción cuando ellos contienen agua en los poros. De esta manera es mucho más económico y, para muchos propósitos, más adecuado el cemento inorgánico (Cemento Portland Ordinario) que tiene una gran reacción alcalina y en consecuencia no es adecuado para ser reforzado con fibras de vidrio A y E ordinario, debido a que estas no resisten el ataque de los álcalis.

En vista de lo anterior, existe una gran diferencia entre esos dos grupos de materiales reforzados con fibra. En consecuencia es evidente que la mayoría de las investigaciones dentro de los grupos se mantienen separadas. Por otra parte es de reconocer que existan probabilidades de utilizar ciertas experiencia obtenidas en el primer grupo, que significan una ayuda para resolver muchas dificultades que se hallan en la producción de materiales reforzados del segundo grupo.

Por consiguiente se examinarán algunos de los problemas involucrados en la producción de materiales inorgánicos reforzados con fibra. Un aspecto que es muy importante es la producción de asbesto-cemento y materiales afines, aunque además es de indudable interés el refuerzo de concreto y mortero con fibras para muchos propósitos especiales.

I.6 MECANISMOS Y COMPORTAMIENTO

Actualmente está bien establecido que el uso de fibras cortas tiene como fin mejorar las propiedades de deformación y resistencia de la matriz de cemento. El concepto de reforzar con fibras es el de usar la deformación de la matriz sujeta al esfuerzo para que esta transfiera carga a la fibra, y así alcanzar mejoras substanciales si las fibras son fuertes y rígidas y están cargadas hasta la fractura, proporcionando lo anterior con una fracción mínima de volumen de fibra.

Las fibras que comúnmente se usan en concreto se pueden clasificar ampliamente en dos tipos: *Fibras de bajo módulo y gran alargamiento* como el nylon, polipropileno y polietileno que son capaces de absorber muy grandes energías características; ellas no se enfocan al mejoramiento de la resistencia, sin embargo, por el contrario proporcionan tenacidad y resistencia al impacto a cargas explosivas. *Fibras de alta resistencia y elevado módulo*, como el acero, vidrio, asbesto y carbón producen por otra parte compuestos fuertes; estos materiales en principio proporcionan resistencia y rigidez y propiedades dinámicas en grados variables.

Se usan fibras cortas y discontinuas en el desarrollo corriente del concreto reforzado con fibras. En consecuencia la adherencia matriz-fibra llega a ser irregular y discontinua. Aparte de la geometría de la fibra y de sus relaciones de aspecto, otros factores, tales como el volumen de la fibra, la orientación y las técnicas de fabricación influyen profundamente las propiedades y el modo de falla del compuesto con fibras. El papel esencial de las fibras es controlar el avance de las grietas que tienden a crecer, desarrollando fuerzas de contracción en el extremo de la grieta, retardando de esta manera su propagación a través de la matriz y creando un período de propagación de grietas bajo y distinto. De esta manera se ve aumentada en muchas veces al deformación por agrietamiento con respecto a una matriz no reforzada.

Las propiedades de la matriz también son importantes. Son bien conocidas las propiedades de los compuestos de matrices plásticas o metálicas en las cuales se insertan las fibras. Con matrices metálicas la transferencia de esfuerzos de la matriz a la fibra ocurre a través de la deformación plástica de la matriz. Con matrices plásticas de la extensibilidad elástica de la matriz transfiere carga a la fibra. La diferencia fundamental de los compuestos con fibra basados en cemento y los otros materiales reforzados es que la deformación de la matriz a la falla es una fracción en relación a la deformación que es capaz de rendir la fibra. Por otra parte la matriz es viscosa y porosa y en consecuencia no se ha comprendido totalmente al mecanismo exacto de como las fibras cortas refuerzan la matriz del concreto.

Un planteamiento de la mecánica del control de grietas se usa en el desarrollo de las ecuaciones que calculan la primera grieta y la última resistencia flexional de el concreto reforzado con fibras de acero orientado aleatoriamente. Se muestra entonces que la ecuación de espaciamiento establece relación entre el espaciamiento de las fibras y la resistencia flexional. Las ecuaciones teóricas muestran una relación excelente entre los resultados obtenidos de muchas pruebas en pastas, morteros y concreto reforzado con fibra, incluyendo numerosos parámetros, como proporciones de la mezcla, geometría de la fibra, volumen de la fibra y tamaño y volumen de los agregados.

1.6.1 MECANISMOS DE CONTROL DE GRIETAS CON FIBRA DE REFUERZO

El mecanismo de refuerzo de matrices de cemento reforzado con fibras fue explicado primero como ROMUALDI y BASTON. Ellos sugirieron que las fibras actúan como interruptores de la propagación de las grietas, desarrollando fuerzas de apresamiento, las cuales tiendan a cerrar las grietas. Considerando un campo de tensión directa y aplicando al principio del mecanismo de fractura elástica lineal, se vio que la primera grieta de resistencia flexional fue inversamente proporcional al espaciamiento geométrico de la fibra para un contenido de volumen de fibras dado. El espaciamiento geométrico de la fibra de esta manera llegó a ser un factor crítico en los mecanismos de control de grietas. Posteriormente ROMUALDI y MANDEL mostraron que se podía obtener un incremento en la resistencia a la primera grieta mezclando directamente las fibras cortas dentro de la matriz.

1.6.2 CONCEPTOS DE ESPACIAMIENTO

Mientras que es fácil de definir el espaciamiento de las fibra, como un sistema en el cual las fibras son colocadas en una dirección específica, al visualización del espaciamiento de las fibras orientadas aleatoriamente en compuestos es conceptualmente complicado. El espaciamiento de las fibras es fundamentalmente una cantidad geométrica que caracteriza la forma de la distribución de las fibras. El concepto de espaciamiento de las fibras es importante, aunque es un concepto puramente geométrico sin importancia en la interacción entre la matriz y la fibra, y el modo de falla y no puede explicar totalmente el mecanismo de las fibras de refuerzo o resistencia y las propiedades de deformación del compuesto.

El mecanismo de control de agrietamiento de ROMUALDI y BATSON se basa, en principio, en el concepto de espaciamiento de la fibra y la cual establece una relación entre la primera grieta de resistencia por tensión del compuesto y el espaciamiento de la fibra.

Probablemente la mayor desventaja del concepto de espaciamiento de las fibras es que se basa en un campo de esfuerzos de tensión directa, mientras que los resultados usados para probar el concepto están basados en pruebas de tensión indirecta o a la flexión. Los resultados de pruebas de tensión directa parece que no cumplen con las predicciones de la teoría en tanto que los resultados tomados de pruebas de tensión indirecta o flexional son más bajos que los estimados por la teoría de espaciamiento.

La resistencia del concreto con la inherente falla estructural interna se puede aumentar, aumentando la tenacidad a la fractura, disminuyendo el tamaño de las fallas, o disminuyendo el factor de intensidad de esfuerzos en los extremos de las grietas internas.

La propuesta tomada por ROMUALDI y MANDEL para aumentar la resistencia a la tensión del mortero fue la de reducir el factor de esfuerzo usando alambres espaciados muy próximos entre sí como inhibidores de grietas.

Los resultados de teóricos relacionados con el esfuerzo de propagación de la primera grieta y el espaciamiento se muestran en la fig.(1). Para varios porcentajes de volumen de fibra con relación al mortero, para valores dados de factores de intensidad de esfuerzo. ROMUALDI y MANDEL mostraron que los resultados de las fibras, espaciados muy cerca una de la otra, se podía lograr mezclando fibras cortas en el mortero. Los resultados se pueden apreciar en la fig.(2), en la cual se compara el porcentaje de resistencia del concepto reforzado con fibras con relación a la resistencia de agrietamiento del concreto simple como una función del espaciamiento de la fibra. La relación de la raíz cuadrada inversa utilizado para los esfuerzos en la fig.(1) es la implicada en esos resultados.

Las pruebas de SNYDER y LAUKARD fig.(3) demostraron el efecto del refuerzo de fibra en la resistencia a la formación de la primera grieta a la flexión. En todas las pruebas se mantuvo el contenido de la fibra de acero en un 2% por volumen.

Las variaciones del espaciamiento se obtuvieron haciendo variar el diámetro de la fibra, usando la ecuación:

$$s = 13.8d \sqrt{\frac{V_f}{p}}$$

donde:

S = espaciamiento entre los centroides de las fibras

d = diámetro de la fibra

p = porcentaje volumen de fibra

Los resultados de LANKARD y SYNDER muestran la sensibilidad de los resultados en la longitud de las fibras así como el espaciamiento promedio entre las fibras.

1.6.3 ESPACIAMIENTO EFECTIVO

En relación a los compuestos reforzados con fibras orientadas al azar, se admite que el concepto de espaciamiento se basa totalmente en una geometría o en una supuesta distribución ordenada de las fibras, aunque ello no sea de gran utilidad en la compresión del mecanismo de refuerzo con fibra. Una definición formal de un compuesto no solo considera la descripción estadística del espaciamiento de los centroides de las fibras, sino que también considera la interacción matriz-fibra y modo de falla. Esto se completa con el concepto de espaciamiento efectivo.

Aún cuando el "espaciamiento" de las fibras es una cantidad básicamente geométrica (dificilmente involucrada con cierta relevancia en algún proceso físico, tales como agrietamiento o fractura) el caso es diferente con "espaciamiento efectivo".

Se deduce que el espaciamiento efectivo en fibras orientadas al azar en un compuesto requiere de información de las propiedades físicas de interacción involucradas, como el refuerzo de adherencia en la interfase matriz-fibra, al modo de falla, la geometría de la fibra. En cierta forma el espaciamiento facilita la reducción de un sistema isotrópico estadístico en un sistema isotrópico transversal equivalente (o un sistema reforzado con fibras alineadas en una dirección) que simplifica el estudio de un medio bajo condiciones de carga uniaxial. En el estudio del espaciamiento de fibras cortas KAR y PAL han hecho ensayos tomando en consideración esos factores, incluyendo un factor de eficiencia de adherencia en sus ecuaciones de espaciamiento efectivo.

Sin embargo se ignoró la distribución de esfuerzo cortante en la interfase matriz-fibra; en ausencia de grietas se había considerado la distribución de esfuerzo cortante debido a la presencia de una grieta que se presenta en la vecindad de una fibra.

1.6.4 RELACION ENTRE LAS ECUACIONES DE ESPACIAMIENTO EXISTENTES

Las dos ecuaciones de espaciamiento de ROMUALDI y MANDEL y KAR, PAL y la ecuación de espaciamiento centroidal (que define la distancia entre los centroides de las fibras, sin considerar a las fibras largas parcialmente cubiertas), todas son derivadas para fibras cortas orientadas al azar aunque se supone que las fibras son colocadas en una disposición en forma de cuadro, las relaciones entre esas ecuaciones se puede comprender mejor estudiando los factores que gobiernan el espaciamiento de las fibras.

La relación entre la longitud de la fibra y el espaciamiento (así calculado por las 3 ecuaciones de espaciamiento) para una mezcla que tiene 1.91% de fibras por volumen de la matriz (sin considerar los agregados) y un diámetro de 0.46 mm. como se muestra en la fig. 4. El aumento de espaciamiento centroridial como el aumento de la longitud de la fibra, para volumen constante de fibra, el número de fibras disminuye cuando la longitud de la fibra aumenta. El efecto de las fibras parcialmente cubiertas en el espaciamiento fue considerada por ROMUALDI y MANDEL y en consecuencia sus espaciamientos permanecen constantes al variar la longitud de la fibra. En la ecuaciones de KAR y PAL el espaciamiento disminuye con el aumento de la longitud de la fibra, ya que la eficiencia de la adherencia es mayor en fibras largas que en fibras cortas.

La influencia del diámetro de la fibra en el espaciamiento se muestra en la figura 5, para una mezcla que contiene fibras de varios diámetros y una longitud constante de fibra (25 mm.) y un volumen de fibra de 2%. El aumento del espaciamiento con el aumento del diámetro de la fibra, manteniendo un volumen constante, disminuye el número de fibras al aumentar sus diámetros, aumentando el espaciamiento entre ellas.

1.6.5 UNA PROPOSICION DEL MECANISMO ASOCIADO CON EL CONTROL DE LOS AGRIETAMIENTOS EN UN MATERIAL COMPUESTO CON FIBRAS DE REFUERZO

Hasta ahora los planteamientos han mostrado que ninguna de las ecuaciones convencionales de espaciamiento y mecanismo de control de grietas, pueden explicar adecuadamente todos los factores que intervienen en el mecanismo de refuerzo de matrices de cemento con fibra. Existen 3 consideraciones básicas relacionadas con la transferencia de esfuerzos de la matriz a la fibra cuando éstas son discontinuas o alineadas, aunque el compuesto consista de fibras cortas discontinuas, orientadas aleatoriamente y dispersadas uniformemente en la matriz. Estas son (1) longitud crítica de la fibra o longitud de transferencia de la fibra (longitud análoga a la longitud de transmisión del tendón en concreto presforzado. (2) La adherencia interfase matriz-fibra y (3) eficiencia de la fibra o factor de orientación de las fibras colocadas al azar. Tanto la longitud crítica de la fibra como la adherencia interfacial son independientes y estrechamente relacionados con la relación longitud-diámetro de la fibra (relación de aspecto). Para comprender el mecanismo de reforzamiento con fibras se deben considerar todos los factores.

A continuación se discute brevemente: la longitud crítica de la fibra, la adherencia interfacial y el factor de orientación en relación con las fibras cortas discontinuas. Se presentan en base a esos 3 conceptos nuevos que están relacionados con el concreto reforzado con fibras. En primer lugar el planteamiento de una nueva ecuación de espaciamiento para fibras cortas orientadas al azar y distribuidas con uniformidad en una matriz de concreto. Se toma en cuenta la deficiencia de la adherencia en estas ecuaciones de espaciamiento, introduciendo factores de eficiencia tanto para la longitud y el diámetro de las fibras. En segundo lugar se presenta una proposición de la mecánica asociada con el control de los agrietamientos en un material compuesto para calcular la primera grieta y la última resistencia de flexión en concreto reforzado con fibras de acero. Esas ecuaciones reflejan el criterio de control de grietas, la adherencia interfacial y la orientación al azar de las fibras en la matriz. En conclusión, los conceptos que aquí se presentan van encaminados a establecer una relación entre el espaciamiento efectivo de la fibra, la primera grieta y la última resistencia por flexión del concreto reforzado con fibra.

I.6.5.1 MECANISMO DE LA FIBRA DE REFUERZO

En un sistema compuesto, en general, que comprenda una fase matriz y una fase fibra, son posibles varios modos de falla que dependan de los valores relacionados con las deformaciones de falla de la matriz y de las fibras, así como de la geometría de la fibra y la resistencia de adherencia interfacial matriz-fibra. Es muy común que las fibras en una matriz plástica metálica se fracturan al esfuerzo de falla del compuesto mientras que en concreto reforzado con fibras de acero generalmente ocurre la falla por adherencia en la interface matriz-fibra al llegar a su resistencia última, el compuesto.

El mecanismo de reforzamiento con fibra de concreto reforzado se explica considerando un espécimen sujeto a tensión uniaxial; la acción del refuerzo con fibras sucede a través de los refuerzos de adherencia interfacial matriz-fibra. las grietas se presentan cuando la deformación del compuesto excede a la deformación por agrietamiento de la matriz. Puesto que las fibras son más duras que la matriz ($E_f > E_m$) se deforman menos y en consecuencia desarrollan fuerzas de apriamiento en los extremos de la grieta. En este aspecto el papel de las fibras es análogo al papel de los agregados como inhibidores de grietas en la pasta o en la matriz de mortero, los problemas de la adherencia interfacial el tamaño y forma de la inclusión y del endurecimiento por la inclusión relativa a la matriz, son factores comunes a los dos sistemas.

De esta manera se previene la propagación de las grietas hasta que se alcance el último esfuerzo del compuesto cuando la falla es por cedencia simultánea de la matriz y la fibra o por la falla de la adherencia en la interfase matriz-fibra. El criterio que determina si se presenta cedencia o falla por adherencia es la observación de la longitud de la fibra y la geometría superficial. En general si la longitud de la fibra es más grande que la longitud crítica, las fibras cederán a la falla del compuesto, mientras que para longitudes más cortas que la longitud crítica, ocurrirá la falla por adherencia.

1.6.5.2 LONGITUD CRITICA DE LA FIBRA

Si consideramos una fibra de longitud l y diámetro d insertada en la matriz circunvecina. La carga es transferida por el promedio de esfuerzo cortante interfacial y por el esfuerzo de tensión longitudinal de la fibra f_u , si la fibra es suficientemente larga (fig. 6). En el caso de una fibra corta el esfuerzo f no podría alcanzar el valor necesario para que la fibra se fracture, ocurriendo una falla por deslizamiento o jalado en la interfase. La relación $l_c/2$ es definido como la longitud de transferencia donde l_c es la longitud crítica de la fibra.

Considerando el equilibrio:

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{d\sigma}{dl} = \pi d \tau \quad \frac{dl}{d\sigma} = \frac{d}{4\tau} \dots\dots\dots(1)$$

el esfuerzo de fractura solamente se alcanza cuando

$$\frac{l_c}{2} = \sigma_f u \frac{d}{4\tau} \quad \text{ó} \quad l_c = \sigma_f u \frac{d}{2\tau} \dots\dots\dots(2)$$

la relación de aspecto o la forma de la fibra debe ser entonces

$$\frac{l_c}{d} \geq \frac{\sigma_f u}{2\tau} \dots\dots\dots(3)$$

El valor de la l_c depende de σ y si ocurre la falla por adherencia, representará simplemente la fuerza de fricción por unidad de área entre la matriz y la fibra. Entonces análogamente la fuerza de fricción puede ser una medida adecuada de ductibilidad, resistencia al agrietamiento y tenacidad del compuesto. El esfuerzo de tensión de la fibra no es constante a lo largo de la longitud (fig. 7) y de esta manera considerando la resistencia de un compuesto con fibras discontinuas, se debe usar el esfuerzo promedio en lugar de f_u . El esfuerzo promedio de las fibras en una longitud l_c es $f_u/2$ (suponiendo una distribución lineal), pero si las fibras son más largas que l_c , el esfuerzo promedio se aproximará del esfuerzo máximo f_u , actuando las fibras efectivamente como fibras continuas. Es evidente que las fibras discontinuas resistirán menos efectivamente que las continuas aunque con las fibras largas, la diferencia en resistencia progresivamente llega a ser menor.

1.6.5.3 ADHERENCIA INTERFACIAL MATRIZ-FIBRA

El esfuerzo de adherencia interfacial y el esfuerzo de tensión de la fibra están estrechamente relacionados, con la relación de aspecto de la fibra. El esfuerzo de adherencia interfacial de la fibra de acero en una matriz de concreto se puede considerar compuesto de dos partes.

1).- El esfuerzo de adherencia interfacial causada por la transferencia de carga de la matriz a la fibra. En la (fig. 7) se puede observar la representación gráfica de los refuerzos cortantes desarrollados en la longitud de la fibra en la interface y los esfuerzos de tensión de la fibra para varias relaciones de aspecto en relación al valor crítico. Los esfuerzos de tensión en los extremos de la fibra valen cero y tienden a desarrollarse hacia el centro de la fibra, de forma muy parecido a las fuerzas que se presentan en los tendones en sistemas pre-reforzados, los esfuerzos cortantes tienen un valor máximo en los extremos de la fibra y valor cero a una distancia $l_c/2$ del extremo. Para fibras largas ($l > l_c$) la zona central está libre de esfuerzos cortantes: Para fibras cortas ($l < l_c$) se presentan esfuerzos de adherencia a través de toda la longitud de la fibra.

2).-El esfuerzo de adherencia interfacial causado por la presencia de una grieta. Esta distribución se presenta en la vecindad de una grieta con valores máximos de esfuerzo los cuales disminuyen al aumentar la distancia a partir del borde de la grieta (fig. 8). Una grieta generalmente genera discontinuidad en la distribución de esfuerzos de adherencia.

Una combinación de efectos que considera la distribución de esfuerzos de las fibras cortas en ambos casos, se muestra en la (fig. 8). En el planteamiento de las ecuaciones de espaciamiento algunos investigadores no consideran la forma de la distribución de esfuerzos de tensión. Aunque KAR y PAL consideran un factor de eficiencia de adherencia únicamente para la longitud de la fibra y no tomaron en cuenta la eficiencia de adherencia relacionada con los distintos diámetros de las fibras.

1.6.5.4 EFICIENCIA DE LAS FIBRAS ORIENTADAS ALEATORIAMENTE

Cuando las fibras discontinuas cortas son orientadas aleatoriamente en la matriz se presenta el problema para determinar el "factor de eficiencia" o "longitud efectiva" o "factor de orientación" de las fibras. En un sistema de orientación de fibras aleatorias. Son efectivas en el control de las grietas únicamente las fibras con una orientación paralela, y aproximadamente paralela a las trayectorias de los esfuerzos de tensión.

Pero para aquellas fibras que están orientadas menos efectivamente en el espacio se debe aplicar una corrección. Suponiendo una distribución uniforme de las fibras en la matriz y basados en muchas suposiciones se han propuesto varios factores de orientación. La veracidad de esos factores de orientación dependen de la validez de esas suposiciones, aunque se puede ver que en el caso de fibras colocadas al azar, las fibras se pueden orientar en alguna dirección con igual probabilidad, en consecuencia al factor de 0.411 propuestos por ROMUALDI y MANDEL es exacto.

1.6.5.5 ESPACIAMIENTO EFECTIVO DE LAS FIBRAS PARA FIBRAS CORTAS DISCONTINUAS

En el planteamiento de la ecuación de espaciamiento, se considera la distribución de esfuerzo de adherencia interfacial debidos a la transferencia de carga y los esfuerzos originados por la presencia de una grieta como se ve en la (fig. 8) la deficiencia de la adherencia se toma en consideración induciendo factores de eficiencia de adherencia de longitud y diámetro de las fibras. Se define el factor de eficiencia de adherencia por longitud n_1 como el porcentaje de resistencia de adherencia de una fibra orientada al azar, de longitud l y diámetro d . Suponiendo una distribución de esfuerzos de adherencia como se ve en la (fig. 8) se puede mostrar que:

$$n1 = \frac{0.821\delta}{fud} \dots\dots\dots(4)$$

El factor de eficiencia de adherencia por diámetro nd se define como el porcentaje de resistencia de adherencia de una fibra de diámetro d y longitud Tc con relación a la resistencia de adherencia de una fibra de diámetro d y longitud Tc. Entonces de la ecuación (2) se puede mostrar que:

$$nd = \frac{d}{d} \dots\dots\dots(5)$$

El parámetro nd proporciona un valor de comparación del mecanismos asociado con fibras de diámetros diferentes pero de la misma longitud. Es de hacer notar que la elección de d es arbitraria y es simplemente una referencia de comparación con las otras fibras. La introducción de nd y n1 proporcionan el planteamiento de una ecuación de espaciamiento más general como se verá a continuación.

Suponiendo una matriz en forma de cubo de lado L que contiene un porcentaje de volumen p de fibras en la matriz.

$$P = \frac{25Nnd:l}{L^3} \dots\dots\dots(6)$$

a donde N es el número de fibras de diámetro d y longitud l.

Aplicando el factor de eficiencia de adherencia (n1) por longitud, un factor de orientación que puede variar de 0.41 a 1 y un factor de eficiencia de adherencia nd a 'd'. El porcentaje volumétrico efectivo de fibras en la matriz es:

$$Pe = \frac{25N \cdot \pi}{L \mu} \left(\frac{d}{d}\right) \cdot 0.41 \cdot \left(\frac{0.821r}{ofud}\right) l$$

o

$$\frac{Pe}{p} = \frac{0.41 \times 8.21 \pi d}{ofud} \dots\dots\dots(7)$$

El volumen efectivo de fibras que están en la matriz y que actúan efectivamente en la dirección del esfuerzo uniaxial, así como el número equivalente de fibras de longitud l alineadas en la misma dirección está dado por:

$$V_{fe} = \frac{P_e l^3}{100} y N^3 = \frac{P_e l^3}{25 \rho d^3} \dots \dots \dots (8)$$

Suponiendo una distribución rectangular de las fibras, el espaciamiento efectivo "Se" es:

$$S_e = \sqrt{L^3 / N^3}$$

Substituyendo N^3 y P_e en términos de P , y haciendo reducciones:

$$S_e = 15.287 \sqrt{\frac{\sigma_f m d^3}{t}} \sqrt{\frac{d}{P_f}} \dots \dots \dots (9)$$

haciendo evaluaciones de u y d del esfuerzo de adherencia interfacial t dando para la primera grieta y la carga última en el módulo de ruptura, el espaciamiento efectivo esto dado por

El módulo de Ruptura de la primera grieta

$$S_e = 27 \sqrt{\frac{d}{P_f}} \dots \dots \dots (10)$$

y el último módulo de ruptura

$$S_e = 25 \sqrt{\frac{d}{P_f}} \dots \dots \dots (11)$$

1.6.6 RESISTENCIA A LA FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS CORTAS Y DISCONTINUAS ORIENTADAS AL AZAR

Se presenta una proposición que unida con el control de los agrietamientos en un material compuesto sirve para calcular el módulo de ruptura de la primera grieta y el último módulo de ruptura del concreto reforzado con fibras discontinuas cortas orientadas aleatoriamente. El concreto reforzado con fibras de acero generalmente presenta una falla por adherencia en la interface matriz-fibra. La primera grieta se presenta en el compuesto cuando la deformación del compuesto excede la deformación de agrietamiento de la matriz (fig. 9). Además al estar cargadas las fibras se tensan, actuando como inhibidoras de grietas de manera análoga a la acción del agregado grueso en concreto simple, ocasionando un periodo de baja propagación de grieta y un pérdida progresiva de adherencia de las fibras (fig. 10). Muy cerca de la carga última se presenta una propagación inestable de grietas, alcanzando simultáneamente su valor último la resistencia de adherencia interfacial (u) que se presenta entre la fibra y la matriz y originando la falla por jalado de la fibra.

La fractura del compuesto ocurre simultáneamente debido a la propagación inestable de las grietas y a la falla de adherencia. Tanto la fibra como la matriz actúan juntos como un compuesto de dos fases hasta la falla y contribuyen en esta forma a la resistencia del compuesto. Sin embargo como la falla es por adherencia el esfuerzo de tensión máxima en la fibra es menor que la resistencia última fu por la cual las fibras no contribuyen totalmente a la resistencia del compuesto.

Para que las deformaciones elásticas de la matriz y la fibra sean iguales a una resistencia de tensión directa (ct) aplicada a un compuesto que contiene fibras continuas en una dirección, lo anterior se puede expresar por la ley de los proporcionamientos como:

$$ct = mc Vm + f Vf \dots \dots \dots (12)$$

En donde v y V representan esfuerzos y fracciones de volumen respectivamente y los subíjvos "c", "m" y "f" representan el compuesto, la matriz y la fibra respectivamente y "t" la tensión directa.

La ecuación (12) depende solamente de las propiedades y las fracciones de volumen de los constituyentes, independientemente del estado de esfuerzos a que está sujeto el compuesto. Aunque la teoría hasta ahora se ha aplicado a un campo de esfuerzos de tensión por flexión con ligeras modificaciones.

Como se sabe el módulo de ruptura de la matriz m_r , m está relacionado con la resistencia de tensión directa.

$$m_r \cdot m = m^t$$

donde generalmente varía entre 1.3 y 1.5, multiplicando toda la ecuación (12) por

$$ct = m_r m V_m + f V_f \dots \dots \dots (13)$$

El módulo de ruptura del compuesto es más difícil de definir (fig. 11). El concreto simple existe cierta distribución plástica de esfuerzos en la zona de tensión anterior a la falla, aunque generalmente se supone una distribución de esfuerzo lineal (fig. 11) si esto fuera cierto para concreto reforzado con fibras el módulo de ruptura del compuesto $m_r \cdot c$ relacionado con el módulo de sección Z por

$$M = m_r \cdot c Z \dots \dots \dots (14)$$

donde M es el momento aplicado, sin embargo se sabe que el concreto reforzado con fibras no mantiene una distribución de esfuerzos lineal; y la distribución de esfuerzos por flexión no es lineal (fig. 11) y se relaciona con la resistencia de tensión directa como sigue:

$$M = ct \cdot (Z) \dots \dots \dots (15)$$

donde (Z) es análogo al módulo plástico y más específicamente es un factor que relaciona el último esfuerzo de la fibra, el módulo de sección elástica y al momento aplicado.

Igualando las ecuaciones (14) y (15)

$$m_r \cdot c = ct \dots \dots \dots (16)$$

Multiplicando por a a la eq. (13) y substituyendo (16) en (13)

$$ct = m_r \cdot V_m + f V_f$$

6

$$m_r \cdot c = \frac{1}{a} \cdot m_r \cdot m V_m + f V_f \dots \dots \dots (17)$$

En compuestos de concreto reforzado con fibras de acero orientadas al azar la falla ocurre por jalado de la fibra. En consecuencia substituyendo para f de la ecuación (2) y substituyendo V_f por la fracción de volumen efectivo de fibras.

$$m.f.c = / . mr. m V_m + 0.82 V_f 1/d(18 a)$$

En la ecuación (18 a) la constante relaciona el esfuerzo último de la fibra del compuesto con el momento externo aplicado: el esfuerzo último de la fibra depende de esfuerzo de adherencia interfacial y en consecuencia no se pierde la generalidad al volver a escribir la ecuación (18 a) como:

$$c_f = A m V_m + 0.82 V_f 1/d(18 b)$$

donde el valor de T incluye la influencia de

La ecuación 18b se puede aplicar para calcular tanto la primera grieta y la última resistencia de flexión con valores adecuado para y es válido si la matriz es concreto mortero o pasta endurecida. En la fase de la primera grieta el esfuerzo de adherencia interfacial en la ecuación 18b corresponde al promedio de los esfuerzos de adherencia cuando la adherencia empieza a deslizarse. En la fase de falla los esfuerzos de adherencia interfacial alcanzan la última resistencia de adherencia promedio u entre la fibra y la matriz.

Los resultados de las pruebas de resistencia por flexión de R.N. Swamy, S. Mangat y K.rao y otros investigadores se comprobaron con los obtenidos por la ecuación (18). Los resultados de las pruebas relacionadas con concreto, mortero y pasta reforzada con fibras cubren una gran variedad de proporciones de mezcla, geometría de la fibra, varios métodos de curado y dos tipos de cemento. La (fig. 12) muestra la relación que existe entre la ecuación (18 b) y la primera grieta de resistencia por flexión: la (fig. 13) muestra la relación teórica con la última resistencia por flexión. En ambos casos se realiza un análisis de regresión, obteniendo las siguientes ecuaciones.

Primera grieta de resistencia del compuesto

$$c_f = 0.843 m V_m + 2.93 V_f 1/d(19)$$

El coeficiente de correlación para el análisis de regresión fue de 0.98. De las ecuaciones (18 y (19) el esfuerzo promedio de adherencia en la primera grieta es de $=36.4 \text{ Kg/cm}^2$ (515 psi).

La última resistencia por flexión del compuesto

$$u = 0.97 m \sqrt{m} + 3.41 V_f l/d \dots\dots\dots(20)$$

de la cual el último esfuerzo de adherencia $u = 42.31 \text{ Kg/cm}^2$

La excelente relación de los resultados de las pruebas en la fig. 13 y 14 con la ecuación (18) deducido teóricamente justifica el mecanismo de falla que se consideró en la deducción de la ecuación.

Los resultados muestran que el promedio del esfuerzo de adherencia es muy independiente de las proporciones de mezcla de la matriz; la constante en el primer término del lado derecho de las ecuaciones (19) y (20) son teóricamente la unidad. Una explicación posible de la discrepancia es que la resistencia a la flexión del concreto es una cantidad un tanto incierta y que puede variar significativamente en varios especímenes, de las mismas proporciones de mezcla; de esta manera se toman en consideración el efecto de todos los pormenores que influyen en la resistencia por flexión.

1.6.7 RELACIONES ENTRE EL ESPACIAMIENTO DE LA FIBRA Y LA RESISTENCIA A LA FLEXION

Las ecuaciones de espaciamiento de las fibras deducidas para fibras discontinuas cortas se pueden relacionar con la primera grieta de resistencia flexional (ecuación 19) y la última resistencia por flexión (ecuación 20). La figura 14 muestra la relación que existe entre la ecuación de espaciamiento de R. N. SWAMY, S. MANGAT Y RAO y la primera grieta de resistencia por flexión, observándose que las estimaciones teóricas muestran una gran afinidad con los resultados obtenidos por otros investigadores. (la fig. 14) Muestra dos curvas teóricas basadas en la resistencia por flexión registrada por WATER HOUSE y LUKE y LANKARD los mismos datos se practicaron contra otras ecuaciones de espaciamiento, mostrando una gran dispersión sin una relación.

La figura 15 muestra la relación contra la ecuación de espaciamiento de R. N. SWAMY, S. MANGAT y RAO y la ecuación de la última resistencia por flexión (20). Las tres curvas teóricas se refieren a los datos de WATER HOUSE y LUKE, KAR y PAL, LANKARD y la variación de la resistencia de la matriz y del contenido de agregado que usaron varios investigadores. La única relación entre el espaciamiento de la fibra y la resistencia por flexión se muestra en las figuras 14 y 15, que combinan el razonamiento teórico que existió antes del desarrollo de la ecuación de espaciamiento y de las ecuaciones de resistencia por flexión de SWAMY, MANGAT y RAO.

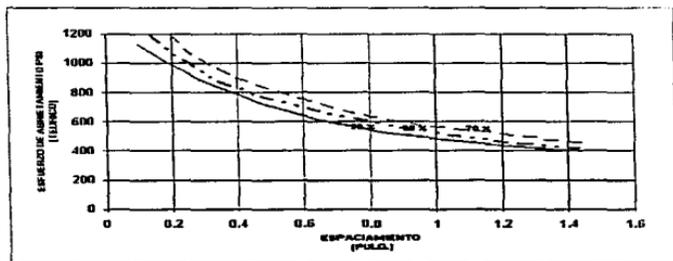


FIG. 1.- ESFUERZO TEORICO DE AGRIETAMIENTO EN TENSION.

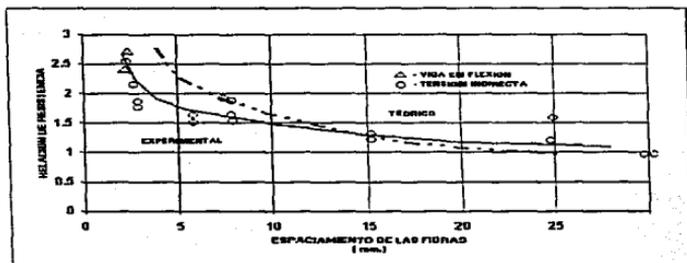


FIG. 2.- RELACION DE RESISTENCIA, TEORICA Y EXPERIMENTAL COMO UNA FUNCION DEL ESPACIAMIENTO DE LA FIBRA

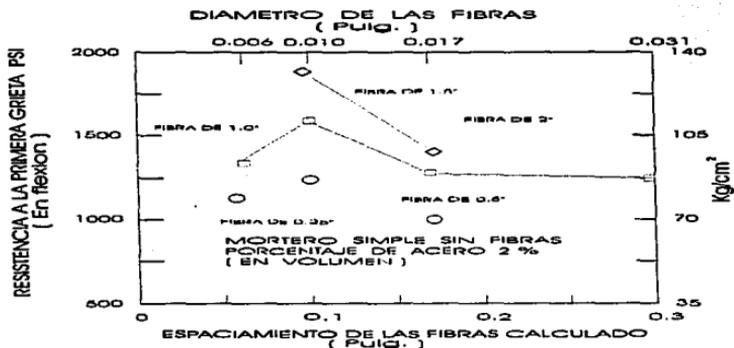


FIG. 3.- EFECTO DEL ESPACIAMIENTO EN LA RESISTENCIA A LA PRIMERA GRIETA EN FLEXION DEL MORTERO REFORZADO CON FIBRAS.

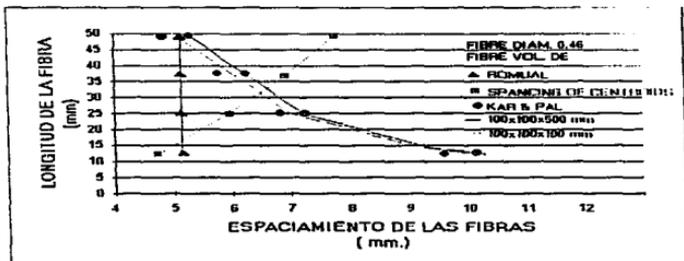


FIG. 4.- RELACION ENTRE LA LONGITUD DE LA FIBRA Y EL ESPACIAMIENTO

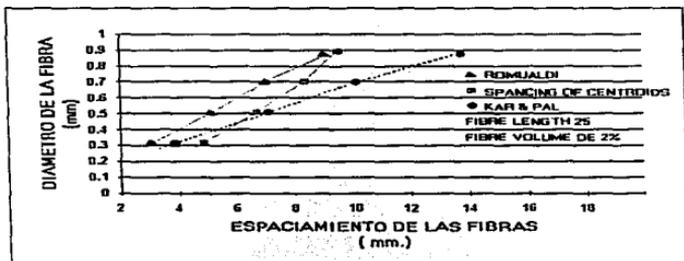


FIG. 5.- INFLUENCIA DEL DIAMETRO DE LA FIBRA EN EL ESPACIAMIENTO

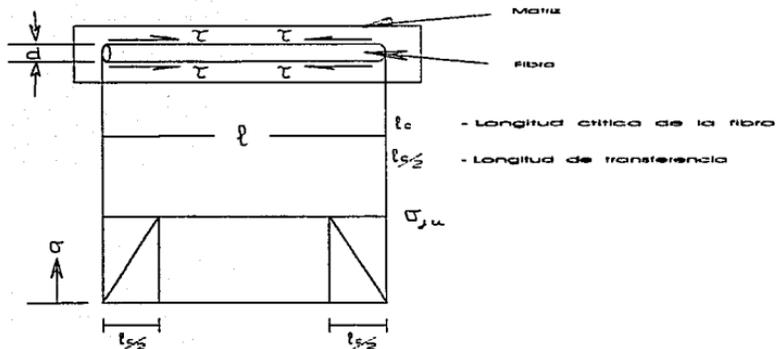


FIG. 6.- DISTRIBUCION DE ESFUERZOS EN LA FIBRA.

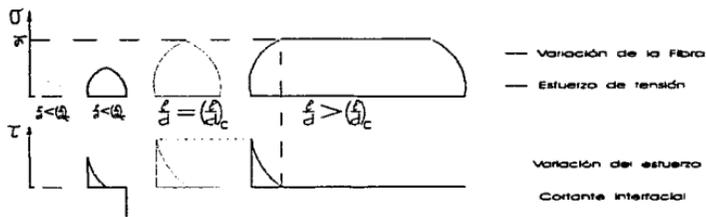


FIG. 7.- VARIACION ESQUEMATICA DE EL ESFUERZO CORTANTE INTERFACIAL Y EL ESFUERZO DE TENSION DE LA FIBRA.

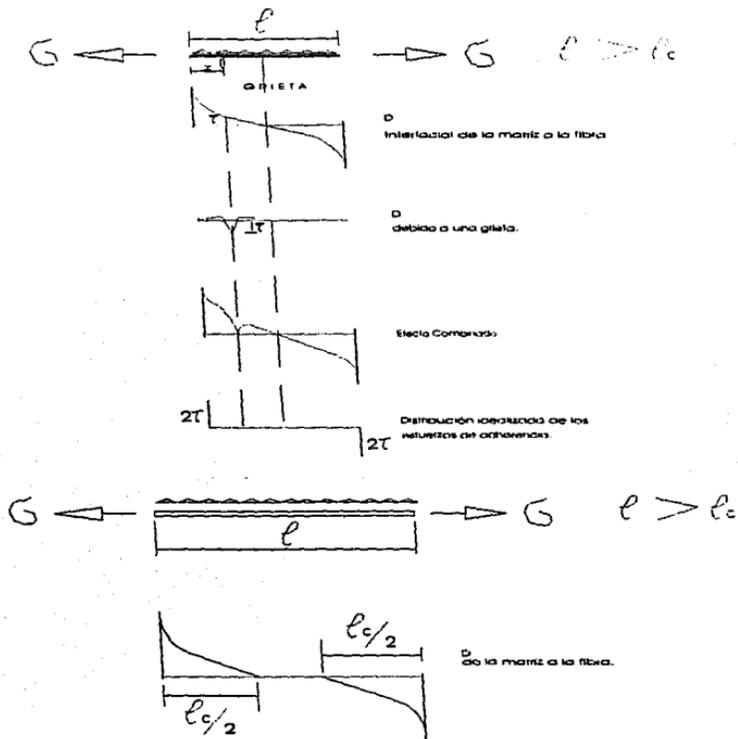


FIG. 8.- ESQUEMA DE LA DISTRIBUCION DE ESFUERZOS DE ADHERENCIA EN LA INTERFASE MATRIZ-FIBRA.

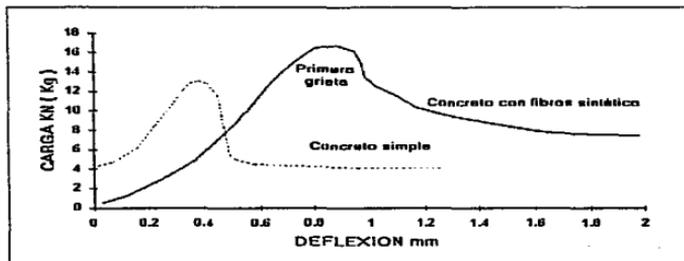


FIG. 9.- CARACTERÍSTICAS DE CARGA-DEFLESION DE CONCRETO SIMPLE Y CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS A FLESION.

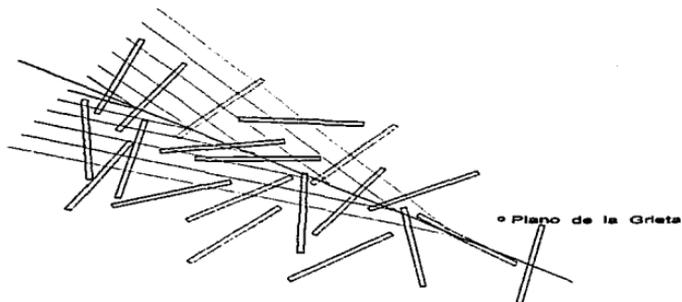


FIG.10.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA PROPAGACION DE UNA GRIETA LENTA Y EL DESLIZAMIENTO PROGRESIVO DE LAS FIBRAS CORTAS.

¿Cuál es el módulo de ruptura del concreto con fibras?

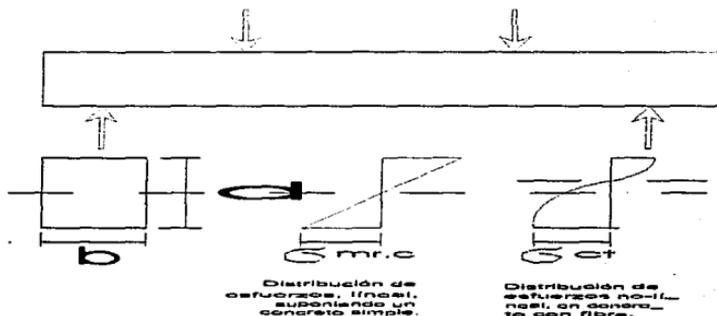


FIG. 11.- DISTRIBUCION DE ESFUERZOS DE EL MODULO DE RUPTURA A LA FALLA.

- ▲ Waterhouse y luke, mortero.
- Waterhouse y luke, concreto con agregado grueso de 10 mm.
- ◻ Waterhouse y luke, concreto con agregado grueso de 19 mm
- Lankard, mortero.

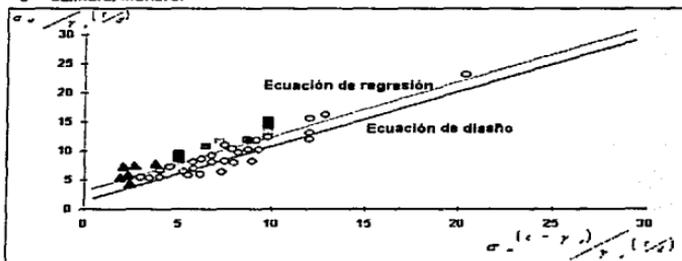


FIG. 12.- CORRELACION ENTRE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y LA ECUACION DE LOS MATERIALES DEL COMPUESTO (CONCRETO-FIBRA) PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA PRIMERA GRIETA DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.

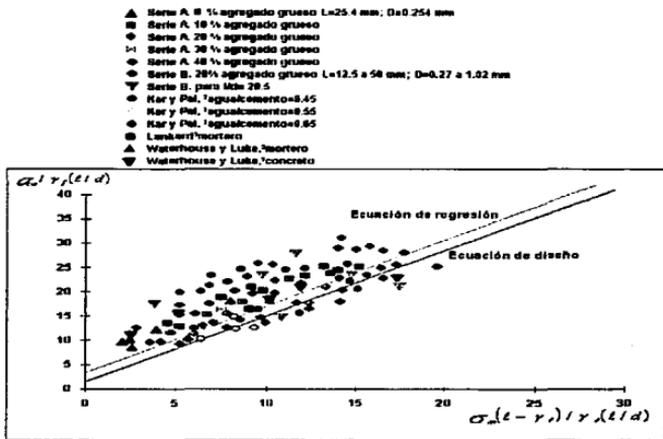


FIG. 13.- CORRELACION ENTRE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y LA ECUACION DE LOS MATERIALES DEL COMPUESTO (FIBRA-CONCRETO) PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA ULTIMA EN FLEXION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.

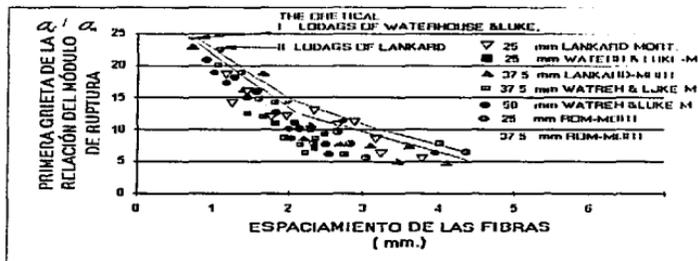


FIG. 14.- RELACION ENTRE EL ESPACIAMIENTO DE LA FIBRA DE SWAMY, MANGAT Y RAO Y LA PRIMERA GRIETA DE MÓDULO.

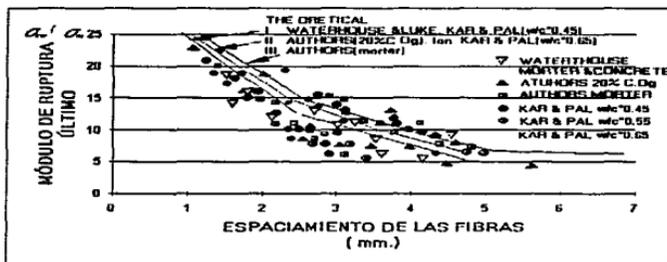


FIG. 15.- RELACION ENTRE LA RAZON DE EL ÚLTIMO MÓDULO DE RUPTURA Y LA ECUACION DE ESPACIAMIENTO.

1.6.8 RESUMEN DE LOS MECANISMOS DE COMPORTAMIENTO

Los mecanismos para mejorar la resistencia a la fractura de los compuestos de CRF, se resumen de la siguiente manera:

1) El hecho de utilizar fibras con módulo de elasticidad alto, dura y gruesas, puede traer como consecuencia irregularidades en la consolidación de las microestructuras, tales como la formación de vacíos o la segregación de partículas del agregado. Así que el diseño y las técnicas del mezclado son consideraciones importantes desde el punto de vista de las mecánicas de comportamiento. El proceso de producción debe pues asegurar que los beneficios al momento de añadir la fibra, deberán superar cualquier efecto negativo que estas puedan tener posteriormente.

2) Los mismos mecanismos y conceptos de detención del agrietamiento y fuerza de fractura que se utilizan en el concreto reforzado, también son utilizados en compuestos de concreto inmaduro. Así que fibras de todo tipo, incluyendo materiales de bajo módulo de elasticidad capaces de utilizarse en altas concentraciones, son reconocidas por producir mejoras significantes a la fuerza de fractura, tanto en compuestos de concreto maduro como inmaduro.

3) La eficiencia adecuada de la fibra, y la combinación de varios factores incluyendo, las propiedades del material, el grado de unión, la concentración y los efectos del área superficial, pueden ser aseguradas en varias formas, procesos de producción y para fibras de diferentes materiales y geometrías, mediante el logro de un grado deseado de eficiencia en la fibra, se obtiene una confiabilidad en el comportamiento del material tanto antes como después de la ruptura, requerida para aplicaciones específicas.

4) Utilizando el concepto de análisis de resistencia de los materiales, las fibras se limitan solamente a conducir las fuerzas a través del compuesto; al incorporarse los conceptos relacionados a los mecanismos de fractura, se le da una mayor confiabilidad al material para mantener su integridad y contribuir a la conducción de los esfuerzos a través de todo el volumen.

I.7 CONSIDERACIONES DE PRODUCCION Y DISEÑO EN LOS COMPONENTES

En la teoría de la resistencia de los materiales del concreto reforzado convencional, el módulo de elasticidad del refuerzo, o sea la fibra, debe ser mayor que el del concreto mismo, ya que este tiene poca capacidad de transmitir los esfuerzos, de todas formas, en el caso del concreto habrá un radio modular favorable, aún para el tipo de fibras con un bajo módulo de elasticidad. También, cuando una grieta aparezca y se extienda por cualquier razón, el módulo dentro de la misma será cero y existirá un radio modular favorable para cualquier fibra, y así poder transmitir el esfuerzo directamente al refuerzo. De esta manera forma prevalece la capacidad por parte de la fibra de cualquier tipo, de alto o bajo módulo de elasticidad, de transmitir el esfuerzo a través de toda la grieta, dando como resultado:

- A) Una adecuada unión y anclaje del esfuerzo.
- B) Una oportunidad para las fibras en participar.
- C) Una alta concentración de fibra y por lo tanto una mayor probabilidad de que una grieta encuentre una de ellas.

En la teoría de los mecanismos de fractura y de la absorción de energía, el alto módulo de elasticidad que pueda tener el refuerzo (fibra), tiene relativamente poca importancia, lo que resulta más importante es la combinación de algunas propiedades de la fibra, el grado de unión y concentración de la misma que nos da una noción de lo que puede ser llamado eficiencia de la fibra ya que afecta directamente su resistencia a la ruptura, una vez más, una fibra gruesa y con un módulo de elasticidad alto, puede acarrear problemas al momento del mezclado y al adecuada consolidación de las partículas del material afectando la resistencia a la ruptura del CRF. En este caso, o en el de concentraciones altas de fibra no es posible, cuando menos durante el proceso de batido y mezclado, lograr un espaciamiento óptimo de la fibra real, ni una concentración adecuada de la misma, para influir adecuadamente en su resistencia a la ruptura, debido a esto, se requiere un cuidado especial durante el proceso de mezclado al momento de utilizar fibras gruesas.

La cantidad de fibra y la superficie específica es esta, son parámetros muy importantes; para mejorar la resistencia a la ruptura del CRF, la fuerza de fractura se incrementa cuando el rango de liberación de energía de la tensión es menor que la energía requerida para formar nuevas superficies de grietas. Este concepto está unido a los mecanismos de absorción de la energía en la presencia de fibras, y a la probabilidad de que las fibras influyan notablemente durante el proceso de desarrollo de la grieta.

1.8 LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES EN MECANISMO DE FRACTURA

Al buscar una teoría que unifique la mecánica de comportamiento del CRF, encontramos dos principales; la de reforzamiento convencional que se refiere a la resistencia de los materiales (RM), y la de detención de la grieta-absorción de la resistencia referida a los mecanismos de fractura (MF). Aunque ambas gozan de importancia, está puede ser mayor o menor dependiendo de la formulación y la técnica de producción específica utilizada para la producción del CRF. Se ha dado muy poco énfasis al entendimiento de las mecánicas de comportamiento del CRF y como resultado las características de absorción de energía han sido poco utilizadas.

Una tecnología moderna del concreto y de la fibra, así como de su producción desarrollada gracias a la utilización de aditivos y mezclas químicas y minerales, ha renovado el interés en el aprovechamiento de los mecanismos de fractura en el CRF.

1.8.1 PARAMETROS IMPORTANTES DE LA FIBRA

De todo lo dicho con anterioridad, se puede concluir que para cualquier parámetro, relacionado con la geometría de la fibra, es importante la forma en que está afecta la eficiencia de la misma. Por ejemplo, la probabilidad de que una grieta alcance un tamaño considerable antes de encontrarse con una fibra, depende en la manera en que esta progresa hacia adentro y alrededor de las otras fibras, y de la cantidad de estas en una unidad de volumen, de manera similar; algunos de los mecanismos de absorción de energía, dependen del área superficial de fibra disponible dentro de una unidad de volumen de concreto.

Si consideramos una masa de compuesto CRF dentro de un volumen específico, como el demostrado en la siguiente figura, comenzando desde el cubo más grande al más pequeño, el diagrama representa las fracciones de volumen:

- A) Total de compuesto CRF.
- B) El aglutinante que es aproximadamente 0.3 unidades del compuesto.
- C) 1.0 por ciento de volumen de fibra.
- D) 0.1 por ciento de volumen de fibra.

dependiendo de una formulación particular de CRF. Ahora bien, por un porcentaje de volumen de fibra dado, la porción de esta puede consistir en una o en muchas fibras lo cual solo puede ser determinado durante el proceso de vertido de la misma. Ahora, el número real de fibras en una unidad de volumen del compuesto, denominado cantidad de fibra (CF), se obtiene de la expresión:

$$CF = \frac{1.75 (PDF) (10^4)}{(L) (D)^2 (GE)} = \frac{1.27 (V)}{(L) (D)^2} = \frac{1.3 (PDF) (10^3)}{(L) (DDM)} = \frac{5.08 (V) (GE) (10^6)}{(L) (DDM)}$$

EN DONDE:

V = PORCENTAJE TOTAL DE VOLUMEN DE FIBRA DIVIDIDO POR 100.

L = LONGITUD DE LA FIBRA.

D = DIAMETRO EQUIVALENTE DE LA FIBRA.

GE = GRAVEDAD ESPECIFICA DE LA FIBRA.

PDF = PORCENTAJE DE DOSIFICACION DE FIBRA.

DDM = DENIER DESPUES DE MEZCLADO.

Multiplicando la cantidad de fibra, por el área superficial de una porción individual, nos da la superficie específica de la fibra (SEF), en una unidad de volumen del compuesto.

$$SEF = (CF) \cdot (D) \cdot (L)$$

$$SEF = \frac{[2.36 (PDF) (10.3)]}{(D) (SG)} = \frac{[4 (V)]}{(D)} = \frac{[4.71 (PDF)]}{(DDM) (GE) 1/2} = \frac{[8 (V) (GE) 1/2 (10.3)]}{(DDM) 1/2}$$

Existen otras consideraciones que el diseñador debe de tomar en cuenta al momento de determinar la dosificación de fibra en el compuesto. Por ejemplo, mientras mayor sea la cantidad de fibra, el espaciamiento de las mismas será menor, y su distribución podría ser afectada por la cantidad del compuesto, y viceversa, la distribución del compuesto aglutinante puede ser afectada por la habilidad de la fibra para dispersar las partículas del mismo, esto es una realidad sobre todo para el tipo de fibras rugosas y tiesas

Para determinar el área de una sección teórica de fibra de refuerzo, para una sección de corte del compuesto, cuyas fibras se encuentren uniformemente distribuidas, la longitud real de la fibra deberá ser considerada en relación a la dimensión de la unidad de volumen de CRF. Si por ejemplo, la unidad de volumen fuera de un centímetro, y la longitud de la fibra medio centímetro, y perfectamente alineadas, entonces se tendrían que colocar dos fibras extremo con extremo y así ocupar toda la unidad de volumen de CRF. En otras palabras se considera a las fibras perfectamente alineadas y ocupando las dimensiones de la unidad de volumen, esto se demuestra gráficamente en la siguiente figura. Si en la realidad la unidad de volumen fuera seccionada, dejando al descubierto la sección de material y de fibra, estas áreas se verían de la forma mostrada a continuación.

Ahora bien, se toma en cuenta que las fibras normalmente no están perfectamente alineadas, sin embargo se da por hecho de que si están perfectamente distribuidas. Esto quiere decir que la fibra es solo el 54 % efectiva en cualquier sección dada.

La expresión que determina el área de la sección de cualquier cantidad de fibra uniformemente distribuida depende de la fracción de volumen de fibra y del factor de escala (Co), determinado en base a las unidades aplicadas a la geometría de la fibra y a las dimensiones del concreto, cuya área de sección de fibra este por ser determinada, por ejemplo hablando en unidades americanas, donde las unidades están en pulgadas, si las dimensiones del concreto están en pulgadas también $Co = 1.0$, si las dimensiones del concreto estuvieran en pies $Co = 12.0$, en el sistema internacional $Co = 1000$, si las dimensiones de la fibra están en mm., y las del concreto en metros, entonces el área de sección de fibra **af** será:

$$af = (0.54) [Vf/100] (Co)^2$$

en donde el factor 0.54 (54%), es utilizado de nuevo para representar la efectividad de las fibras uniformemente distribuidas en cualquier dirección.

1.8.2 ESFUERZO Y DISPERSION DE LA ENERGIA DE LA TENSION

¿ Como afecta entonces la fibra en el desempeño del CRF ? . Para contestar esta pregunta, los investigadores han encaminado sus estudios hacia el concepto ya conocido del concreto reforzado. Así que este concepto puede ser tomada como una referencia útil en el análisis teórico del CRF. Este concepto acepta la acción de la ruptura como un hecho, y el requerimiento del refuerzo, en este caso la fibra, para conducir los esfuerzos de fatiga a través de toda la grieta, se sabe que mientras este es un concepto valido para el concreto reforzado, es algo incompleto en el caso del CRF, ya que descarta otra contribución muy importante de la fibra de refuerzo llamada detención del agrietamiento y absorción de energía, no obstante, el beneficio significativo de comportamiento después de la ruptura, así como el espaciamiento óptimo de la fibra de refuerzo, ha acelerado el estudio y la explotación del comportamiento después de la ruptura del CRF.

Las fibras que se probaron en un principio fueron las de acero, pero posteriormente aparecieron otros tipos de fibras diferentes. Estas fibras eran de nylon, polipropileno, sintéticas, vidrio y naturales; estas tenían una geometría similar y eran igual de gruesas que las fibras de acero, por lo tanto presentaban problemas similares de mezclado con el concreto. También fue un tanto difícil el lograr un espaciamiento adecuado para lograr la resistencia deseada, así como el hecho de que resultaron tener un módulo de elasticidad relativamente bajo, en comparación a las de acero, sin embargo, aún las fibras con un módulo de elasticidad relativamente bajo, dieron buenos resultados en lo referente al comportamiento después de la ruptura, así como a la fuerza dinámica del material.

Debido a los problemas con el mezclado, se probaron fibras aún más gruesas, muy parecidas a clavos de acero. Este avance dio como resultado una reducción significativamente el número de fibras dentro de la mezcla, reduciendo la cantidad de fibra (CF) y la superficie específica de esta, proporcionando espaciamientos promedio aún más grandes en la fibra. Los investigadores simplemente siguieron la teoría inicial de que el espaciamiento óptimo que afecta significativamente la resistencia del material, no podía ser elanzado y que el comportamiento después de la ruptura era la característica primordial por aprovecharse.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

C A P Í T U L O I I

***MODELOS EXPERIMENTALES DE
CONCRETO CON FIBRAS SINTÉTICAS***

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
C A M P U S
A R A G O N**



II. MODELOS EXPERIMENTALES DE CONCRETO CON FIBRAS SINTÉTICAS

II.1 RELACION ENTRE EL ESPARCIMIENTO DE LA FIBRA

La frase "espaciamiento óptimo", necesita ser examinada; esta ha sido entendida solo como una característica espacial, y en el caso del CRFS no lo es, espaciamiento óptimo es la característica que se requiere para asegurar que la propagación del agrietamiento pueda ser detenida y que la energía posterior aplicada al sistema pueda ser absorbida o que produzca otras grietas, en otras secciones en donde la fuerza de resistencia a la fractura sea más baja. Este comportamiento permite el estiramiento porque el material continua por si mismo conduciendo la carga (esfuerzo), mientras se lleva a cabo el esfuerzo de estiramiento y aflojamiento, durante la respuesta carga-compresión.

El mecanismo de detención del agrietamiento es en algo similar a la forma en que los agregados absorben energía y detienen las micro-grietas en el concreto resulta una equivocación el utilizar "espaciamiento óptimo", únicamente como el espaciamiento de la fibra dentro del material es más apropiado del referirse a este término como una eficacia de la fibra, más que un espaciamiento, una mayor eficacia de la fibra esta relacionada al tipo de unión o sujeción de estas, a la dureza, a su número y orientación dentro del material, así como a su espaciamiento.

Incrementando el número de fibras en una unidad de volumen de material o cantidad de fibra (C.F.), se incrementa la probabilidad de encuentro de una grieta con una fibra, al incrementar el área superficial o superficie específica de la fibra (SE), se afecta la cantidad de energía absorbida durante el encuentro de grietas y fibras.

Así pues, el material puede sufrir una fuerza de estiramiento y aflojamiento, y de esta forma seguir actuando, para poder así ser medida la fuerza de resistencia una vez ocurrida la ruptura. Lo mismo sucede con un material menos resistente, pero aquí las fibras deberán de tener una mayor eficacia (unión, dureza, orientación y número), para encontrarse con el incremento de grandes cantidades almacenadas de energía elástica que llevaran al material hasta fallar por completo.

El diagrama muestra diversas formas en que las fibras trabajan para detener las grietas y absorber energía, unas se rompen, otras se desplazan hacia un lado, otras sufren tensiones internas y otras se separan del material. Estos mecanismos no dependen del espaciamiento de la fibra y son efectivos aún en pequeñas cantidades de fibra o una sola fibra. Sin embargo, el efecto de acumular un gran número de fibras, lo mejor distribuidas posible ha demostrado ser de gran significancia.

En fibras espaciadas y arregladas en una misma dirección específica para definir un sistema, es fácil visualizar su espaciamiento y composición, pero en fibras colocadas al azar es conceptualmente complicado. El espaciamiento de las fibras es básicamente una cantidad geométrica la cual caracteriza el patrón de la distribución de la fibra, mientras que el concepto puramente geométrico no tiene relevancia para la interrelación entre la fibra-matriz y el modo de falla. Sin el concepto de espaciamiento no se puede explicar completamente el mecanismo de refuerzo de la fibra o las propiedades de resistencia y de formación del compuesto.

El mecanismo para interrumpir el agrietamiento de Romualdi y Baston, está basado en un espaciamiento geométrico, el cual establece la relación entre la primera grieta y la resistencia a tensión del compuesto y el espaciamiento de la fibra. Probablemente, el mayor inconveniente del concepto de espaciamiento geométrico es, que está basado en esfuerzos de tensión directa, en tanto que los resultados usados para demostrar el concepto, están basados en pruebas de flexión o tensión indirecta.

Los datos basados en las pruebas de tensión directa no parecen seguir las predicciones de la teoría y los datos basados en las pruebas de flexión o tensión indirecta, son más bajos que aquéllos predichos por la teoría. Además, en la interrupción del agrietamiento, el concepto de espaciamiento de la fibra sólo reconoce la resistencia al agrietamiento inicial y no explica el comportamiento posterior del agrietamiento así como la resistencia última del compuesto, las cuales son propiedades significativas para el diseño y necesarias de tomarse en cuenta.

En la figura 11 se muestran los resultados de las pruebas llevadas a cabo por Romualdi y Mandal, en las cuales se compara la relación de resistencia (relación entre la resistencia a la aparición de la primera grieta del concreto reforzado con fibras y la resistencia del agrietamiento del concreto simple) como una función del espaciamiento de las fibras.

Pruebas llevadas a cabo por Snyder y Lankard, muestran el efecto del refuerzo de la fibra en la resistencia a la aparición de la primera grieta (véase la Figura 12). Todas las pruebas fueron hechas con un contenido de fibra de 2 por ciento por volumen, se realizaron variaciones en el espaciamiento, así como en el diámetro de la fibra, de acuerdo con la siguiente expresión para el promedio de espaciamiento de la fibra.

$$s = 13.8d \frac{\sqrt{G}}{p}$$

donde:

S = espaciamiento entre los centroides de las fibras, mm.

d = diámetro de la fibra, mm.

p = porcentaje de refuerzo por volumen

Los resultados obtenidos por Snyder y Lankard también demuestran la influencia de la longitud de la fibra, ligeramente diferentes a la de Romualdi. En esta ocasión el espaciamiento está dado por:

$$S = \frac{L\sqrt{G}}{p}$$

donde:

S = espaciamiento de las , mm.

V = Volumen de una fibra, mm.

P = Porcentaje de fibras en el mortero

En la Figura 13 se hace una comparación de estas ecuaciones.

II.2 APLICACION DEL CONCRETO REFORZADO CON LA FIBRA DE POLIPROPILENO

El desarrollo de un nuevo material para la construcción es un proceso en el que intervienen diversas etapas, aún cuando exista un completo estudio desde el desarrollo de las pruebas de laboratorio hasta la utilización práctica de ese nuevo material siempre se suscitarán problemas a resolver. Lo anterior es inevitable para la industria de la construcción ya que se deben obtener estructuras y productos durables a bajo costo.

En el desarrollo de un nuevo material de construcción como el concreto reforzado con fibras es importante no sólo comprender los problemas y las técnicas relacionadas con el empleo del material en la obra, sino también las limitaciones y ahorros que se obtienen con su aplicación. Se debe hacer énfasis en los usos prácticos del material así como en el equipo disponible para la elaboración de concreto convencional. Además de demostrar las ventajas y limitaciones del concreto reforzado con fibras es recomendable discutir las aplicaciones prácticas y las futuras, particularmente en aquellas áreas donde las propiedades de las fibras resultarán con un comportamiento y ahorros superiores al del concreto simple.

Actualmente las aplicaciones comerciales más comunes son a base de pasta de cemento, mortero o concreto, en los cuales el refuerzo se proporciona por medio de diferentes tipos de fibras: *asbesto, acero, vidrio o polipropileno.*

II.2.1 FIBRAS DE POLIPROPILENO

Una característica de importancia es que el contenido de fibra de polipropileno varíe entre 0 y 1% por peso de la mezcla. Un incremento en el contenido de fibra provoca la disminución de la trabajabilidad (la pérdida de esta última es aplicable a todas las mezclas con cualquier tipo de fibra).

Debido a que las fibras de polipropileno son repelentes al agua se deben usar aditivos para humedecer la fibra o mezclar por más tiempo la fibra en el concreto, es decir 30 segundos más del período usual. La adherencia es otro factor importante, por lo anteriormente expuesto se hace notar que la adherencia fibra-concreto será puramente mecánica.

Respecto al comportamiento del concreto-fibra de polipropileno endurecido se puede afirmar que con 0.2% de contenido de fibra por peso de la mezcla se obtiene control en el agrietamiento. Pruebas de flexión sobre especímenes con 0.7% de contenido de fibra parece ser el indicado para asegurar que el compuesto concreto/fibra, pueda soportar más carga después de que aparece el primer agrietamiento, así como controlar el agrietamiento del elemento y , de este modo prever un funcionamiento aceptable de elementos tales como paneles de fachadas.

II.2.2 CONCRETO CON FIBRAS

Los productos de concreto precolado cubren una gran variedad. En total diferentes tipos de concreto se han usado de acuerdo con las condiciones de aplicación requeridas. Muchos elementos son pequeños y en ellos es difícil de alcanzar un refuerzo efectivo aún en casos muy necesarios (esto aplicado a estructuras, losas delgadas, marcos de ventanas, etc.). En muchas aplicaciones el concreto no se usa por sus propiedades resistentes, pues es más importante mejorar su resistencia al impacto, abrasión y sus propiedades de aislamiento térmico y deformabilidad.

Por las razones antes expuestas, las técnicas del concreto reforzado con fibras son particularmente adecuadas para la producción de elementos de concreto precolado y muchos de ellos merecen mucho trabajo de investigación.

Muchos investigadores han trabajado en este problema. Ellos han desarrollado concretos o morteros reforzados con fibras vegetales, minerales o sintéticas. La adición de las fibras metálicas mejora la resistencia a la tensión del concreto y durabilidad al congelamiento y deshielo. Las fibras de madera producen propiedades térmicas interesantes. Las fibras de asbesto mezcladas con cemento producen al asbesto-cemento un material con muy altas propiedades mecánicas. Las fibras de vidrio también constituyen un material de refuerzo.

La preparación y desarrollo de concreto compuesto propone muchos problemas lógicos, mecánicos, físicos, químicos y económicos. La fabricación e instalación será posible a través de las técnicas convencionales. También es necesario que al refuerzo de fibras y la matriz del concreto sean químicamente compatibles. Las fibras de vidrio comunes y corrientes están sujetas al ataque químico y deben ser protegidos o usarlas con cemento con bajo contenido de álcalis. La adherencia química o mecánica entre las fibras y el concreto debe ser suficientemente fuerte y resistente a fin de asegurar la efectividad del material compuesto y permitir la transferencia de esfuerzos. Se han realizado trabajos de investigación en relación a las "formas de las fibras metálicas con el fin de mejorar la adherencia con el mortero. Por otra parte la relación calidad/costo son tan altas que originan una situación algo difícil en vista del bajo precio del concreto, además la durabilidad es satisfactoria.

Esas diferentes consideraciones motivaron la investigación del concreto reforzado con fibras de polipropileno.

II.2.3 POLIPROPILENO

Las fibras de polipropileno son fibras sintéticas empleadas principalmente en la industria textil. Cuando se usaron como material de refuerzo de concreto, las principales características fueron las siguientes:

Resistencia a la tensión 5000 kg/cm²

Bajo módulo 0.05×10^6 kg/cm²

Resistencia a la corrosión

Propiedades hidrofóbicas

Cuando el concreto cubre a las fibras de polipropileno, estas se protegen de la radiación UV que originaría oxidación y pérdida de resistencia.

Un costo relativamente alto

II.3 FABRICACION Y UTILIZACION DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRA DE POLIPROPILENO

Experimentos hechos con fibras de polipropileno han demostrado que la fabricación de esos concretos es delicada, en especial cuando se usan altos contenidos de fibras. En la práctica las fibras tienden a enredarse y esto dificulta la homogeneidad de la mezcla. Los experimentos preliminares confirmaron la necesidad de preparar primero una revoltura seca de grava, arena y fibras, proceder a un mezclado de 2 minutos con el objeto de que las fibras se distribuyan y mejoren la adherencia matriz-fibra. Después de este mezclado preliminar se procede a un segundo mezclado de 2 minutos, que deberá tener lugar durante la adición del cemento y el agua. La naturaleza hidrofóbica propia de las fibras y las dificultades del mezclado requieren de mucha agua ($w/c = 0.5$). Esto ha sido la causa de la contracción observada con altos porcentajes de fibra (fig. 1).

En caso de altos porcentajes de fibra, sería conveniente aplicar la técnica de succión para mejorar la compactación y remover el agua de exceso. En estas pruebas la preparación se basa en técnicas de vibración para obtener una distribución satisfactoria de las fibras.

II.3.1 RESISTENCIA DE LOS CONCRETOS

Los experimentos realizados han demostrado que se debe distinguir dos tipos de concretos; los que tienen bajos contenidos de fibra (0.2%-0.6% por peso) y los que tienen altos contenidos de fibras (0.6%-2% por peso) (ver Tablas 1,2).

Se notará que la resistencia a la compresión y al flexión son más grandes que las del concreto control, en el caso de bajos porcentajes de fibras. Se ve que los valores muy bajos de concreto con altos porcentajes de fibra, se puede explicar por la falta de homogeneidad de la mezcla que se incrementa por la cantidad de fibras. El porcentaje de resistencia del concreto reforzado con el de concreto simple es más bajo a los 28 días que a los 7 días después de colados. Esta disminución sin embargo no avanza más adelante.

La investigación de falla, del espécimen de prueba mostró que las fibras impiden la propagación de las grietas. Los esfuerzos de compresión aplicados a especímenes de prueba de concreto reforzado con fibra no causan falla instantánea como ocurre en el caso de concreto simple. Su falla se debe en general a la desorganización de la estructura.

II.3.2 DEFORMACION Y COMPORTAMIENTO EN COMPACTACION DE LOS CONCRETOS.

Las medidas de los módulos de varios tipos de concreto en varias investigaciones han demostrado que el módulo de los compuestos de concreto disminuye con el aumento del porcentaje de fibras (Fig. 2). A bajos porcentajes de fibras el módulo se aproxima al de los concretos simples. Si el nivel de porcentaje de fibras aumenta, el valor del módulo es aproximadamente igual al de las fibras. Este es un descubrimiento interesante ya que ello indica que es posible ajustar el módulo de esos concretos de acuerdo a los requerimientos.

El comportamiento a la flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno es muy diferente al del concreto simple. La falla del concreto simple es instantánea y abrupta, mientras que la falla del concreto reforzado en fibras es gradual. Las fibras "cosen" a la grieta en todo lo largo del espécimen de prueba y limitan su propagación. Experimentos en especímenes de prueba a los cuales se aplica esfuerzo de tensión demuestra que la adherencia entre las fibras y la matriz causan la falla de casi todas las fibras.

II.3.3 RESISTENCIA AL IMPACTO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO

La prueba de impacto se hace en vigas de 60 x 60 x 2.5 cm. Un cilindro de metal con una esfera en el final se tiró desde una altura que se incrementó en 5 cm. cada vez. La tabla muestra los resultados que confirman la resistencia al impacto de esos concretos. Ver tabla 3.

La relación de las alturas de caída: altura de falla o agrietamiento del concreto reforzado con fibras / altura de falla de concreto simple que causa la primera grieta en concreto reforzado con fibra es de 2.5 con un contenido de fibra de 0.6%. La relación es de 3.5 cuando del contenido de fibra es del 1%. Las relaciones de las alturas de caída a la falla es 4 en el primer caso y 6.5 en el segundo caso. En el caso de concreto control, la falla ocurre por ruptura instantánea en el mismo momento, cuando se forma la primera grieta. En concreto reforzado con fibras, la falla ocurre a través de los agujeros, por medio de un esfuerzo de punción y ampliación de la primera grieta.

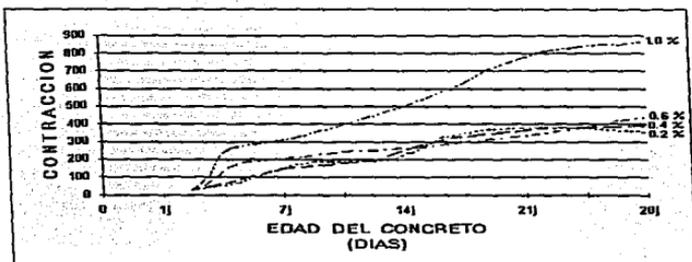


Figura 2.1.- Contracción de el concreto reforzado con fibra en términos de el porcentaje de fibra. (Longitud de la Fibra 7.5 cm.)

TABLA 1

COMPARACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y CONCRETO SIMPLE.

Curado	Edad del concreto + fibras longitud	7 días					28 días				
		0	0.20	0.50	1	2	0	0.20	0.50	1	2
Seco	3.5 cm.	1	1.10	1	0.82	0.72	1	1.04	0.98	0.81	0.70
	4.5 cm.		1.20	1	0.76	0.70		1.08	0.92	0.72	0.65
	7.5 cm.		0.98	0.80	0.60	0.50		0.95	0.78	0.64	0.60
Húmedo	3.5 cm.	1	1.10	0.98	0.80	0.73	1	1.06	0.98	0.81	0.71
	4.5 cm.		1.21	1	0.74	0.70		1.13	0.97	0.74	0.65
	7.5 cm.		0.98	0.82	0.57	0.54		0.88	0.78	0.63	0.60

TABLA 2

COMPARACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPACTACION DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y CONCRETO SIMPLE.

Curado	Edad del concreto ↳ fibras longitud	7 dias					28 dias				
		0	0.20	0.60	1	2	0	0.20	0.60	1	2
Seco	3.5 cm.	1	0.99	1.20	0.87	0.58	1	0.97	1.06	1	0.52
	4.5 cm.		1.04	1.13	1.13	0.59		1.06	0.90	0.91	0.49
	7.5 cm.		0.96	1.02	1.02	---		1	1.04	0.96	---
Húmedo	3.5 cm.	1	1.12	0.80	0.80	0.50	1	0.95	0.94	0.83	0.40
	4.5 cm.		1.12	0.84	0.84	0.45		0.86	0.81	0.68	0.42
	7.5 cm.		0.98	0.80	0.80	---		0.93	0.80	0.67	---

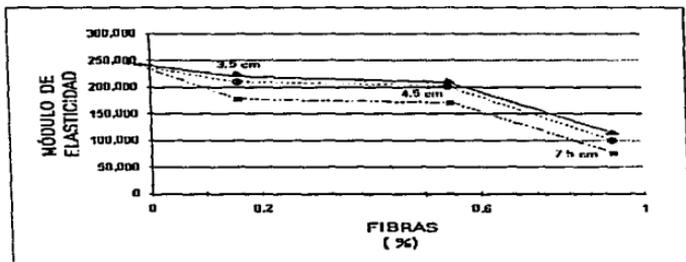


Fig. 2.2- Variación de el Módulo de Elasticidad con el porcentaje y Longitud de la Fibra.

Altura de Caída	Concreto Control	Concreto Reforzado con fibras (0.6% de Fibras)	Concreto Reforzado con fibras (1 % de Fibras)
19 cm.	No afecta Falla	No afecta	No afecta
20 cm.		No afecta	No afecta
30 cm.		No afecta	No afecta
40 cm.		No afecta	No afecta
50 cm.		Primera grieta	No afecta
60 cm.			No afecta
70 cm.			Pequeña grieta
80 cm.			Falla
100 cm.			
130 cm. (o impactos)			Falla

Tabla 3.- Resultados de Pruebas de Impacto con cilindro de 7 kg.

II.4 MANEJO Y COLOCACION DEL CONCRETO CON FIBRA

II.4.1 ANTECEDENTES GENERALES DEL USO DE CONCRETO CON FIBRAS

En una gran parte de los artículos hasta ahora publicados se ha intentado describir el manejo y colocación de todas las fibras generalmente usadas en las mezclas cementosas. Desafortunadamente por varias razones la descripción de los detalles del manejo y colocación de algunas fibras generalmente usadas, se ha restringido a aquellas que están en circulación general y no se ha explicado a partir de la riqueza de información que podría estar relacionada con varias fibras que se usaron en el principio de esta época.

Se establece la comparación de los diferentes tipos de fibras, sus propiedades de mezclado y las categorías del producto final, la variedad de aplicaciones que hasta ahora son los más adecuados, al tipo de fibra particular empleada. No se pretende detallar los méritos particulares de cada fibra, o su economía, ya en la actualidad muchas de las fibras que se usan, solamente se disponen en pequeñas cantidades y sus precios no reflejan una situación estable para consumos regulares.

Históricamente la inclusión a matrices frágiles de substancias de tipo fibra, natural o sintética con el fin de mejorar sus propiedades se ha realizado efectivamente por varios cientos de años. Una cosa análoga fue el uso de los agentes inclusores de aire en los tiempos romanos, los cuales han llegado a ser en los últimos años una inclusión aceptable, para aumentar considerablemente la durabilidad de las mezclas de concreto. El pelo de caballo, el jute y otras fibras naturales como refuerzo de cementos y yesos, se han combinado con una gran cantidad de éxitos.

Más frecuentemente con el aumento del uso del cemento, particularmente en construcción y en la Ingeniería Civil, se ha usado el acero de refuerzo en varias formas para vencer los valores muy bajos de resistencia a la tensión de los concretos. Los sistemas de refuerzo de barra, cables, alambres o mallas son en la actualidad ampliamente comprendidos, tanto en el aspecto de diseño en ingeniería como de las condiciones convenientes de capacidad de trabajo para manejar y colocar el refuerzo en su posición correcta, antes de que el concreto preparado cuidadosamente se coloque alrededor del refuerzo.

Este punto es muy importante con la probable excepción de las fibras de asbesto. El uso de las fibras dispersadas aleatoriamente en la matriz de cemento está en un estado corriente de desarrollo y no existe un diseño comprensivo y una capacidad de construcción en el campo de los compuesto de fibra y cemento.

Sin embargo grandes avances han tenido lugar en el perfeccionamiento de técnicas, particularmente en la adaptación de las técnicas de manejo y colocación, que se usan en los plásticos reforzados con fibra de vidrio.

II.4.2 TIPOS DE FIBRAS

Los tipos de fibras y los productos desarrollados son de una gran variedad e incluyen además de los asbestos cortos, cordones largos de asbesto, fibras de vidrio, tanto el vidrio tipo E como el vidrio resistente a los álcalis (CEMFIL), polipropileno, carbón, acero y más recientemente el nylon.

II.4.3 TIPOS DE POLIPROPILENO

Las fibras de polipropileno han sido desarrolladas por la SHELL-INTERNATIONAL para mejorar particularmente la resistencia al impacto de las mezclas de concreto. CARICRETE es la marca de fábrica de este proceso, y se ha empleado principalmente en la fabricación de unidades de pilotes SHELL por el sistema de WEST. En los tres últimos años la producción comercial de esas unidades en varios lugares en todo el mundo se han realizado usando fibras de polipropileno de 12000 diners y 40 milímetros de longitud producido por la BRITISH ROPES. El proceso desarrollado por WEST demostró la capacidad para la fabricación de productos de concreto, mejorando continuamente las técnicas de manejo de las fibras.

Al principio de las fibras se cortaron en un máquina de un solo cordón, recogidas en un peso determinado y adheridas a la revoladora de tipo Artesa. El concreto resultante produjo las unidades SHELL por la técnica de compactación vibratoria de REMAS. El segundo estado de desarrollo fue una máquina de corte de muchos cordones aunque nuevamente con una alimentación manual de las fibras de polipropileno. El tercer desarrollo fue totalmente automático, con el uso de cortadores de muchas cabezas de cordones, capaces de manejar arriba de 240 filamentos simples de fibras de polipropileno. El funcionamiento de esas cortadoras en totalmente automático y suficiente fibra es cortada por una máquina que proporciona fibra a una revoladora por medio de una banda transportadora en un tiempo de 45 segundos. Las fibras son agregados al final del ciclo de mezclado del concreto. Junto con el operador que controla la planta mezcladora de concreto se emplea un segundo hombre para cambiar los carretes de polipropileno que se determinan.

Arriba de 2 ½ millones de unidades se han producido y la propiedades mejoradas de resistencia al impacto se están usando para desarrollar nuevos productos en el campo de los pilotes. Otros usos de estos compuestos con fibra, incluyen recubrimientos delgados en unidades flotantes de block de poliestireno. Una variedad limitada de unidades precolados para sustentar tubos, bases para invernaderos, etc., donde la resistencia mejorada al impacto es un beneficio deseable.

II.4.4 FIBRAS DE POLIPROPILENO (APLICACIONES)

El costo relativamente elevado de las fibras de polipropileno y los problemas encontrados durante la preparación de los concretos reforzados con fibras parecen indicar que las aplicaciones más adecuadas son el campo de elementos de pared delgada. Para esos elementos es muy importante alcanzar un comportamiento al impacto más satisfactorio que una resistencia alta. El concreto reforzado con fibras es usado para depósitos o similares, productos colados sujetos a cargas muertas. Además los elementos reforzados con fibras se pueden desmoldear inmediatamente y son trabajados con herramientas usuales (sierra, taladros, etc.)

Los experimentos que se han realizado hasta ahora suponen más estudios de investigación en aquellos productos terminados que requieren una alta resistencia al impacto (barreras de protección) cerramientos, canales, señales de tránsito, etc., también sería interesante considerar este tipo de refuerzo en concretos de agregados de peso ligero.

II.5 DISEÑO DE MEZCLA

El proporcionamiento de concreto con fibras no tiene bases teóricas, a pesar de que varias se han desarrollado en los últimos años debido al creciente uso de este tipo de concreto.

En la mayoría de los casos las fibras se agregan a la mezclas convencionales antes de saber si es satisfactorio dicho proporcionamiento.

Se sabe que pequeños ajustes en los demás ingredientes pueden producir una mezcla de buena trabajabilidad. A través de la experiencia obtenida se pueden establecer cuatro aspectos del proporcionamiento.

- Primero.** El incremento en el tamaño del agregado grueso trae consigo una mezcla áspera y de baja trabajabilidad.
- Segundo.** Las mezclas deberán tener un exceso de arena; esto es la relación arena/agregado grueso deberá ser entre 50/50 y 70/30. La arena mejora la trabajabilidad y ayuda a prever la formación de "bolas" de fibra durante el mezclado.
- Tercero.** Usualmente es necesario un alto contenido de cemento (hasta 500 kg/m³) para asegurar la trabajabilidad requerida (este aspecto conduce a mezclas sofisticadas en las que se reemplaza una porción de cemento por ceniza volante.)
- Cuarto.** Se han diseñado mezclas con un 4 por ciento de concentración de fibras de acero por volumen de concreto, y han dado resultados satisfactorios, pero son más comunes concentraciones en el 2 y 3 por ciento. En el caso de las fibras de vidrio se ha utilizado una concentración hasta del 3 por ciento, siendo más utilizadas las concentraciones entre el 1 y 2 por ciento.

Todas las fibras de plástico incrementan la viscosidad de las mezclas de concreto en mayor o menor grado. Este incremento en la viscosidad es un factor que limita la cantidad de fibras que se debe añadir a una mezcla determinada. En algunas variedades de nylon, polipropileno y polietileno tiene menor efecto el factor de concentración de fibra y pueden agregarse en cantidades mayores en general el porcentaje en volumen para el nylon y el polietileno no debe exceder del 3 por ciento, mientras que las concentraciones de polipropileno deberán ser inferiores al 7 por ciento.

El procedimiento para el proporcionamiento de un concreto con fibras, es similar al utilizado para mezclas convencionales. Un proporcionamiento basado en la experiencia de mezclas a base de fibras de acero, vidrio y nylon se muestra en la Tabla 4, el cual puede utilizarse para una mezcla de prueba y ajustar en la práctica el contenido de fibra o los demás ingredientes. Una vez que se ha seleccionado una mezcla es recomendable que todo el volumen de concreto con fibras que deba elaborarse se haga en el equipo de fabricación que se dispone en la obra.

II.6 PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO CON LA FIBRA

La plasticidad de la mezcla es importante para asegurar la dispersión adecuada de la fibra. La experiencia obtenida indica que las relaciones agua/cemento deben ser entre 0.4 y 0.6 y el contenido de cemento de 250 a 430 kg/m³ para obtener un adecuado recubrimiento, con pasta de cemento, del área superficial que presentan las fibras.

La trabajabilidad del concreto reforzado con fibras decrece rápidamente con el incremento del "aspecto" de la fibra; también el tamaño o la cantidad de agregado grueso afectan adversamente a la trabajabilidad de la mezcla, aunque una de las principales funciones el agregado grueso es proporcionar estabilidad dimensional a la matriz (concreto), es necesario optimizar el tamaño y la cantidad de dicho agregado para prevenir la fricción interpartículas, así como evitar la formación de "bolas" o "pelotas" de fibras y al mismo tiempo asegurar la función principal del agregado tal como se realiza en el concreto convencional.

La cohesividad del compuesto concreto-fibra puede obtenerse con la incorporación de ceniza volante pulverizada, material finamente molido, o algún aditivo líquido para reducir la interacción entre fibras o entre agregados y fibras. Se puede substituir hasta casi la mitad del contenido de cemento con la incorporación de un aditivo reductor y un inclusor de aire, lo que da por resultado un contenido de cemento más bajo (en la Tabla 5 se presenta un proporcionamiento típico basado en la experiencia de este tipo de concreto con cenizas volante y aditivos). La ceniza volante es más barata que el cemento dando por resultado una economía, además, actúa como retardador del fraguado, que ayuda a la colocación, compactación; y proporciona una mezcla con alto contenido de pasta con un factor de cemento más bajo.

Las características de fluidez del concreto fresco al que se le han incorporado fibras de polipropileno, vidrio o acero de diversos tamaños y de diferentes cantidades se pueden resumir en la siguiente conclusión:

Con la adición del 0.125 por ciento por peso de fibra, se reduce el revenimiento aproximadamente a la mitad del valor original en todos los casos. En mezclas más secas con una proporción cemento/agregado de 1:4.5, y una relación agua/cemento de 0.55, el revenimiento se redujo desde 8.5 cm. a 0 para un concreto simple con un contenido de fibras del 0.5 por ciento por peso.

Pruebas convencionales utilizadas para medir el sangrado y la rapidez de endurecimiento, han demostrado ser de igual aplicabilidad a mezclas que contienen fibras de acero o polipropileno. Estas mezclas con fibras tienen una reducción significativa en el sangrado superficial ya que mejora la cohesión al incrementarse la concentración de fibra.

El incremento en la rapidez de desarrollo del endurecimiento de la mezcla implica una reducción en la presión lateral sobre la cimbra y puede facilitar el descimbrado a temprana edad.

El premezclado de la fibra de vidrio en mezcladoras convencionales podría necesitar de aditivos como son, los óxidos de polietileno o metil celulosa, para las cuales se deben de tomar precauciones especiales al utilizarlos. Hay evidencias de que los compuestos hechos por medio del premezclado pueden no ser eficientes como aquellos que son hechos por medio de la técnica de aspersión-succión. El efecto que causa utilizar un agregado mayor que 5 mm. con las fibras de vidrio no esta bien establecido, y puede reducir la eficiencia de la fibra. Periodos prolongados de mezclado pueden fragmentar o desmenuzar las fibras de vidrio o polímeros.

II.6.1 MEZCLADO DEL CONCRETO CON FIBRAS

El mezclado del concreto con fibras puede ser efectuado por más de un método. la selección del método dependerá de los requerimientos del trabajo a realizar y de las instalaciones disponibles como son, planta de concreto premezclado o mezclado a mano de pequeñas cantidades.

Es necesario tener una dispersión uniforme de las fibras y prevenir la segregación o formación de "bolas" de las fibras durante el mezclado, pero lo más importante parece ser el aspecto (relación entre la longitud y el diámetro de la fibra). Otros factores que pueden afectar la distribución de la fibra son: el porcentaje volumétrico del agregado grueso de tamaño máximo, la granulometría y la cantidad del agregado, la relación agua/cemento y el método de mezclado. El incrementar la relación "aspecto", el porcentaje volumétrico de fibra, la cantidad y el tamaño de agregado grueso aumenta la tendencia de la fibra a formar "bolas".

Para obtener un mezclado uniforme se ha encontrado que la relación "aspecto" para fibras obtenidas de alambre redondo y de fibras de tiras planas de acero deberá ser de aproximadamente 100 como máximo. También, un exceso de contenido de fibra del 2 por ciento de volumen hace difícil el mezclado. Se pueden utilizar mezclas de concreto convencionales pero los requerimientos de espaciamento y trabajabilidad hacen aconsejable el empleo de agregado grueso de 9.5 mm. (3/8") y la cantidad exacta de arena.

II.6.2 SECUENCIA DE MEZCLADO

La secuencia de introducción de los ingredientes, cemento, arena, agregado grueso y fibra, es importante para prevenir la formación de "bolas" en la mezcladora. Es importante que la fibra sea dispersada uniformemente en toda la mezcla.

Para mezclas hechas en plantas de dosificación o camiones revoladora, se presentan a continuación algunas formas de mezclado del concreto con fibras de acero:

- a) Mezclar los agregados y la fibra con anterioridad a la alimentación de la mezcladora, utilizando procedimientos estándar de mezclado, combinando la fibra y los agregados en una banda transportadora o canalón.
- b) Mezclar el agregado fino y el grueso en la mezcladora. A continuación añadirse la fibra y mézclase a velocidad de 12 r.p.m., posteriormente agréguese el cemento y el agua simultáneamente o el cemento seguido del agua y los aditivos.
- c) Introdúzcase la fibra, posteriormente el agregado, el agua y a continuación mézclase, añadido el cemento y el agua restante.
- d) Cárguese la mezcladora con todos los ingredientes mezclados en seco, la cual previamente ha sido alimentada con el agua de mezclado.

Estos procedimientos convencionales de mezclado pueden aplicarse al concreto con fibras de vidrio pero con la observación de que se deberá agregar la fibra al final; las cuales pueden descargarse directamente dentro de la mezcladora o camión-mezcladora (revoladora).

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

11.6.3 EFICIENCIA DE LA FIBRA

Las fibras más comúnmente utilizadas han sido las fibras redondas y rectas y de las siguientes dimensiones 0.4 a 0.5 mm. de diámetro y 25 a 50 mm. de longitud y las fibras planas de 0.25 x 0.56 x 25 mm. Recientemente en los Estados Unidos de Norteamérica se ha incrementado el uso de fibras de 0.625 mm. de diámetro y 62.5 mm. de longitud. Aunque algunos medios de dispersión de la fibra dentro de la mezcladora son esenciales para fibras con diámetro pequeño (0.25 a 0.40 mm.) en general la eficiencia del mezclado se aumenta por medios mecánicos, cualquiera que sea el diámetro o longitud de la fibra. Asimismo, no se presentarán problemas en el mezclado si no excede al 2 por ciento de fibra por volumen, aún cuando se usen fibras con diámetros de 0.30 a 0.63 mm. y longitudes de 25 a 63 mm.

11.7 COLOCACION, DESCIMBRADO Y COLADO DEL CONCRETO REFORZADO CON LA FIBRA

La colocación del concreto con fibras requiere de mayor energía que la que se necesita para el concreto convencional. Con mezclas de baja trabajabilidad de vibración interna puede dejar vacíos que el concreto no puede llenar, ya que no tiene las características de fluidez como el concreto convencional. Con mezclas de alto revenimiento la segregación de la fibra puede ocurrir durante la vibración interna y en consecuencia, una mala distribución de la fibra.

Se recomienda efectuar la colocación del concreto tan cerca como sea posible de su posición final. En el concreto con fibras, lo anterior es de suma importancia ya que éste no posee características de fluidez. Algunas fibras pueden sobresalir de la superficie del concreto dependiendo de la trabajabilidad de la mezcla, del procedimiento de colocación y acabado. Con un diseño de mezcla apropiado, así como una buena colocación y compactación se puede reducir al mínimo la tendencia de las fibras a sobre salir de la superficie del concreto. Aquellas fibras que no están sumergidas en el concreto o que sobre salen, son rápidamente desgastadas por la acción del tránsito cuando el concreto está expuesto a este tipo de servicio. El bombeo de concreto con fibras es factible, pero aún no se ha desarrollado completamente la investigación de este tipo de colocación.

La naturaleza de la fibra dificulta el uso de pala, es preferible usar rastrillos para mezcla con bajo revenimiento. Es aceptable usar métodos estándar de nivelación como son, reglas vibratorias de madera, vibradores portátiles montados sobre tabloncillos o métodos mecánicos como el pavimentador de cimbra deslizante.

En los acabados de la superficie de concreto se pueden usar llanas metálicas o pulidoras mecánicas, una determinada textura superficial se puede obtener por medio de cepillado o escobillado pero debe tardarse el proceso tanto como sea posible para evitar poner al descubierto las fibras. También es posible obtener "excelentes" acabados con un operador o personal experimentado en acabados.

Los métodos estándar de pruebas para determinar el contenido del aire, peso volumétrico, revenimiento y pruebas de resistencia del concreto que pueden utilizar en el concreto con fibras, sin embargo, estas pruebas fueron desarrolladas para el concreto convencional y pueden ser engañosas para el concreto con fibras, por ejemplo véase la figura 6 donde el resultado de la prueba de revenimiento se ve significativamente reducido en una mezcla con fibras en comparación con una mezcla sin ellas.

II.8 COMPACTACION DEL CONCRETO CON FIBRAS

Una de las dificultades en la aplicación del concreto con fibras es el grado de compactación que surge en la colocación y compactación es originada por dos fuentes: una, la fibra y la otra el agregado grueso. Cuando las fibras de acero se agregan a la matriz de mortero, la forma y superficie de la fibra reducen las características de fluidez de la mezcla, la forma alargada y delgada de las fibras crea un entrelazado y la pérdida de agua a través de este fenómeno resulta en el secado de la mezcla.

El uso más común que se le da al concreto con fibras es particularmente para resistir cargas y resulta necesario incorporar agregado grueso en la mezcla no solo porque resulta más barato sino que, al igual que el acero proporciona mejores características al concreto, además de controlar la inestabilidad dimensional de la matriz de mortero, imparte estabilidad a la fractura y absorción de energía.

En la Figura 7 se muestra la influencia del contenido de agregado grueso sobre la resistencia a flexión del concreto con fibras, asimismo, la influencia del contenido de fibra en la formación de "bolas". La presencia del agregado grueso crea fricción entre las partículas (fibra-agregado) y causa distorsión y aglomeración de las fibras durante el mezclado. Esto conduce a dificultades en la colocación y compactación dando inevitablemente, una distribución no uniforme de las fibras y una consecuente reducción en la resistencia y propiedades de deformación del compuesto (concreto-fibra). Para producir una mezcla de trabajabilidad aceptable con la adecuada compactación y sin la formación de bolas de fibra, es esencial el control del volumen fibra-agregado.

Para una mezcladora determinada, la secuencia y duración del mezclado también resultan importantes en la compactación del concreto. Por otro lado, la tendencia del diseño de mezclas debe asegurar la mínima interacción fibra-agregado, entre el proceso de mezclado y la distribución uniforme de la mezcla. Asimismo, se debe tomar en cuenta, su colocación y compactación.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

C A P Í T U L O I I I

**A N A L I S I S D E
R E S U L T A D O S**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
C A M P U S
A R A G O N**



III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

III.1 GRIETAS EN EL CONCRETO

El concreto , al igual que otros materiales, sufre de expansiones y contracciones debidas tanto a diferentes estados de carga, como a efectos de cambios de temperatura que generan diferentes estados de esfuerzo, en el caso de que estos no se consideren en el proceso de elaboración, curado, y servicio de los diferentes elementos estructurales se pueden formar agrietamiento, de los cuales vamos a distinguir dos tipos en forma muy general:

- *ESTRUCTURALES.*

- *NO ESTRUCTURALES*

El primero de ellos es de consideración fundamental en el análisis y diseño estructural en función de las cargas internas o externas a la estructura. Dichos agrietamientos deben de estar restringidos hasta ciertos límites que garanticen la estabilidad estructural del sistema y de estética del mismo.

El segundo de ellos y objeto de estudio en este trabajo, son aquellas grietas de caracter no estructural, provocadas por diferentes esfuerzos en los materiales constitutivos del concreto tanto en estado fresco como endurecido.

Este último caso resulta más difícil de evaluar por el gran número de variables que involucra en relación al primero de ellos, en el que las grietas dependen directamente de esfuerzos y deformaciones para lo cual existe toda una metodología de análisis en su determinación. Un ejemplo de lo anterior podría explicarse en el caso específico del análisis de las características mecánicas de los agregados, concepto que difícilmente estará definido en las especificaciones del proyecto.

Además, se tiene el problema de que las grietas no siempre surgen al mismo tiempo, puesto que en función de las variables que se tengan, esto podrá ser desde muy corto hasta muy largo plazo (de horas o días a meses o años).

III.2 TIPOS DE GRIETAS

En la figura 1.1 se da una clasificación de los diferentes tipos de grietas tanto estructurales como no estructurales, siendo de nuestra mayor consideración las siguientes:

- Grietas por contracción por secado.
- Agrietamiento (grietas superficiales).
- Grietas provocadas por restricciones internas o externas.
- Por contracción plástica.
- Por asentamiento plástico.

La figura 1.2 nos muestra una estructura hipotética de concreto en la cual se observan los diferentes tipos de grietas no estructurales en situaciones típicas.



FIGURA 4.1
TIPOS DE GRIETAS MAS COMUNES EN EL CONCRETO

CLASIFICACIÓN DE GRIETAS INTRINSECAS.

CARACTERÍSTICAS DE GRIETA	LETRAS QUE SE ENCUENTRAN EN LA FIGURA	SUBDIVISIÓN	LOCALIZACIÓN MAS COMUN DE ESTAS GRIETAS	CAUSAS PRIMARIAS (en incluyen restricciones)	CAUSAS SECUNDARIAS/ FACTORES	POSIBLES SOLUCIONES (para todos los casos se considera el adecuado reducir las restricciones)	TIEMPO DE APARICIÓN
Por asentamiento clásico (Fluencia)	A	Sobre Refuerzo	Secciones Profundas	Sangrado Excesivo	Condiciones de secado a edad temprana	Reducciones de Sangrado	De 10 minutos a 3 horas.
	B	Arqueo	Parte Superior de Columnas				
	C	Cambio de Profundidad	Cambios y Losas Pisos				
Por contracciones plásticas	D	Diagonal	Losas Reticulares	Secado rápido a edad temprana	Haja relación de sangrado	Mejorar el curado y evitar el refuerzo superficial excesivo	30 minutos hasta las 6 horas
	E	Al azar	Losas Reforzadas	poco recubrimiento			
	F	Sobre Refuerzo	Losas Reforzadas				
Por contracciones térmicas (externas ó internas)	G	Restricción Externa	Muros Gruesos y Anchos	Exceso en la generación de calor	Enfriamiento rápido	Reducir el calor ó bien aislándolo	De 1 día hasta 2 ó 3 semanas
	H	Restricción Interna	Losas Gruesas	Exceso en los gradientes de temperatura			
Contracciones por secado a largo plazo	I		Losas y Muros Delgados	Ineficiencia en las juntas	Exceso en las contracciones por curado insuficiente	Reducción del contenido de agua y mejoramiento del curado	Varias semanas o meses
Grietas superficiales	J	Acabado inadecuado	superficie	Acabado antes de tiempo	Curado pobre	Mejorar el curado y terminado	De 1 a 7 días, algunas veces mucho tiempo después
	K	Concreto Fluidificado	Losas	Sobre - Allanado			
Corrosión del refuerzo	L	Natural	Carencia de recubrimiento	Carencia de recubrimiento	Concreto de baja calidad	Eliminar causas mencionadas	Más de 2 años
	M	Por cloruro de calcio	Concreto premezclado	Exceso de cloruro de calcio			
Reacción de agregados alcalinos	N		Humedades	Alta reactividad de los agregados alcalinos del cemento		Eliminar causas mencionadas	Más de 5 años

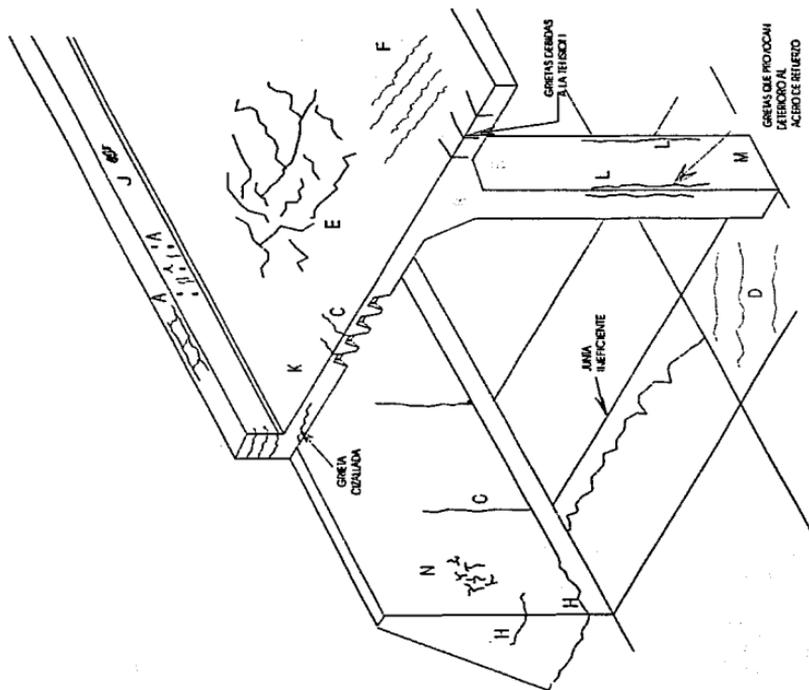


FIGURA 4.2
 ESTRUCTURA HIPOTETICA DE LOS DIFERENTES
 TIPOS DE GRIETAS NO ESTRUCTURALES

III.2.1 GRIETAS POR CONTRACCION PLASTICA Y POR CONTRACCION POR SECADO A LARGO PLAZO

Las grietas producidas por este fenómeno se deben principalmente a los cambios en el contenido de agua del concreto en relación a su edad, entre los factores más importantes al hablar de este fenómeno tenemos la cantidad inicial de agua en la mezcla, la relación de área expuesta y las condiciones ambientales a edad temprana de la misma.

Las grietas por contracción plástica ocurren a las pocas horas de haber sido colocado el concreto, aunque generalmente se les detecta hasta el siguiente día (aparecen en el rango de tiempo comprendido entre los 30 minutos y seis horas) y no se debe confundirse con las grietas por contracción por secado a largo plazo. Este tipo es frecuente verlas en losas o en las caras externas de muros.

Las losas de concreto que hallan sido correctamente aplanadas no deberán exhibir grietas por contracción plástica debido a la acción del allanado que recompacta la mezcla y tiende a cerrar las grietas tan pronto como ellas se forman.

De esta manera tenemos tres tipos básicos:

- Grietas diagonales a 45° separadas en los cantos de las losas de 0.2 - 2.0 m.
- En forma aleatoria formando una red o mapa amplio.
- Grietas que siguen la pauta del acero de refuerzo u otros aspectos físicos como cambios de sección.

Aunque las grietas por contracción plástica pueden ser muy anchas en su parte superior, estas disminuyen rápidamente en función de su profundidad. No obstante, algunas veces estas atraviesan el peralte total de las losas.

Las grietas por contracción por secado a largo plazo se producen por el efecto de contracción antes mencionado (aparecen después de varias semanas o meses).

Como resultado de la reducción en volumen, pueden producirse grietas sólo si el concreto se encuentra restringido en algunos sentidos, pero en el caso específico de este, estudios han demostrado que por el bajo valor de las contracciones a largo plazo, aisladamente, no puede iniciar agrietamientos. Con un adecuado diseño del refuerzo y procesos constructivos adecuados, la probabilidad de los efectos de agrietamiento por contracción por secado estará muy disminuida.

III.2.2 GRIETAS SUPERFICIALES

Las grietas superficiales son el desarrollo de una red de grietas muy finas o hendiduras, que aparecen al azar sobre la superficie del concreto o del mortero, debido a la contracción de la capa superficial. Rara vez tienen una profundidad mayor a los 3 mm. y son más visibles si el acabado de la superficie se realizó con llana metálica. Las áreas hexagonales definidas por estas grietas varían de tamaños desde 9 mm. en casos excepcionales, hasta de 40 mm. de lado a lado. Este tipo de grietas aparecen en el concreto a unas cuantas horas de haber sido colocado o a lo más, al final de la primera semana (algunas veces, mucho tiempo después).

Este tipo de grietas pocas veces dañan la durabilidad o resistencia al desgaste; sin embargo son poco agradables a la vista.

III.2.3 GRIETAS PROVOCADAS POR CONTRACCIONES TEMPRANAS DE TEMPERATURA (RESTRICCIONES FÍSICAS)

La reacción del cemento con el agua, conocida como hidratación, es una reacción química que produce calor. Si el elemento de concreto es lo suficientemente grande se produce un efecto de aislamiento, afectado también por el confinamiento de las cimbras, el cual no permite la pérdida de calor al exterior por lo que la temperatura de la mezcla se eleva. Después de algunos días al temperatura desciende produciéndose contracciones en el elemento, que en función de las restricciones a ese efecto se producirán grietas, mismas que aparecen en el concreto en un periodo de tiempo que va de aproximadamente un día a tres semanas.

Se tienen 2 tipos básicos de restricciones:

- Restricción Externa.

Si el concreto es colocado en una base previamente compactada, o es colado junto a elementos similares sin la previsión de una junta que permita el movimiento, estará posteriormente restringido.

-Restricción Interna.

La superficie de un elemento de concreto fragua más rápidamente que su parte interna; además responderá a las variaciones de temperatura externas más que su núcleo. Es por ello que se tendrán diferenciales de deformaciones a lo largo de la sección y donde ese diferencial sea mayor, como pueden ser secciones gruesas, se presentarán finalmente grietas en la parte externa o superficie del elemento.

III.2.4 GRIETAS POR ASENTAMIENTOS PLASTICOS

Este tipo de grietas son producidas por el efecto de flujo plástico del material, propiedad más conocida como fluencia. Este, es un fenómeno relacionado con la aplicación de cargas con respecto al tiempo debido al reacondo interno de las partículas en función de la aplicación de las cargas ocurriendo esta deformación al mismo tiempo que la hidratación del cemento. Otros factores que influyen en este fenómeno son los materiales constitutivos de la mezcla de concreto, su proporcionamiento y la humedad ambiental.

Las grietas por flujo plástico ocurren solo cuando el sangrado y los asentamientos son relativamente altos y se tienen algunas restricciones al asentamiento.

Los tipos más comunes que se presentan son:

- Grietas directamente por encima de los pasos de los moños de las cimbras o directamente sobre el acero de refuerzo que permanece fijo cerca de la parte externa del elemento.
- Grietas en columnas y muros esbeltos en forma de arco que se forman generalmente en la parte superior de los mismos, efecto que se ve agravado por los traslapes del acero de refuerzo.
- Grietas en cambios de secciones.

III.3 CAUSAS DE AGRIETAMIENTO

En forma general, las principales causas de la formación de grietas son prácticas de diseño y construcción poco adecuadas, de estas podemos mencionar:

- El no colocar juntas de control o aislamiento.
- Preparación incorrecta de la base, en el caso específico de losas sobre el suelo.
- El uso de un concreto con alto revenimiento o la adición de agua.
- Acabado inadecuado de las superficies.

Ineficiencia en el curado.

III.4 METODOS DE PREVENCION O DISMINUCION DE AGRIETAMIENTO

Como ya se mencionó, el concreto siempre se agrieta, razón por la cual resulta muy difícil el obtener un concreto libre de las mismas. No obstante, se puede disminuir o controlar dichos efectos mediante una práctica de diseño y de construcción adecuada, o mediante algún aditivo, que por sus características propias, en correspondencia a las de la mezcla, contribuyan a eliminar este problema.

III.4.1 METODOS COMUNES

Los métodos más comunes de control de grietas se describen a continuación:

La sub-base o subrasante deberá proporcionar apoyo firme y uniforme a la losa de concreto, por lo que antes del colado deberán eliminarse todo los materiales sueltos y basura existente; en lo que se refiere a la capa de apoyo, esta debe ser compactada adecuadamente, cuidando que tenga la pendiente adecuada para que permita escurrimientos y demás, debe de presentar una superficie lisa. Toda la cimbra debe de estar correctamente colocada y sujeta para evitar movimiento de la mismas por empuje de la mezcla de concreto fresco. Inmediatamente antes del colado, deben de humedecerse la capa de apoyo, la cimbra y el acero de refuerzo si existiese.

III.4.2 CONCRETO:

En general es adecuado utilizar revenimientos no mayores a 12 cms y evitar el remezclado. Sin embargo, según los requerimientos del proceso constructivo, pueden utilizarse concretos con revenimiento máximo de 18 cms siempre y cuando la mezcla esté diseñada para dar la resistencia requerida evitando problemas de segregación y sangrado.

En concretos a la intemperie, en lugares con climas extremosos, caso más específico, lugares en los cuales se tengan problemas congelación y deshielo, es recomendable incluir aire en la mezcla para mejorar su durabilidad. En lugares cálidos, en los que se tenga problemas de evaporación excesiva, ésta deberá reducirse por algún medio que evite las grietas por contracción plástica.

III.4.3 ACABADO:

El acabado debe de hacerse en el preciso instante en el que desaparece el agua superficial de la mezcla. Debe evitarse espolvorear o aplanar cemento seco o una mezcla de cemento y arena fina en la superficie del concreto en estado plástico para absorber el agua de sangrado. El aplanado inicial debe ser rápidamente seguido por el pulido mecánico. Para obtener mayor tracción, un escobillado es adecuado para obtener una superficie rugosa.

III.4.4 CURADO:

Debe de iniciarse el curado tan pronto como sea posible, ya sea por anegamiento, aspersión, costales húmedos, capa de arena, plásticos, papel kraft, membrana o cualquier otro método recomendado (ACI 308).

En el caso de curado con membrana, debe aplicarse preferentemente con aspersor y es recomendable poner una segunda capa al día siguiente de la primera aplicación.

Si el curado se realiza utilizando tela de yute mojada, debe tenerse cuidado de que esta se encuentre limpia y debe de mantenerse húmeda al menos 5 días si el cemento utilizado es tipo I o C-2.

Los plásticos para el curado, de espesores mayores o iguales a 0.1 mm., aumentan tanto el sangrado como el agrietamiento en concretos con un alto revenimiento, por lo que éstas deben cubrirse con una capa de arena húmeda de 2 a 5 cms de espesor. Debe evitarse discontinuidad en el curado.

III.4.5 JUNTAS:

El objeto de construir juntas en las superficies de concreto es para absorber los movimientos de contracción o expansión de las losas, provocados por los cambios de temperatura y/o humedad. Las juntas de control pueden realizarse mediante aserrado, labrado o formado de hendiduras de un espesor aproximado de 0.25 del espesor total de la losa. La separación máxima entre juntas debe ser menor o igual a 30 veces el espesor de la losa. La longitud conveniente de estas losas es 1.5 veces el ancho.

Cuando se prevea restricciones en la libertad de movimiento de las losas, por citar algún ejemplo, en las uniones de los pisos con los muros, cimentación o columnas, se deberán colocar juntas de aislamiento. Estas juntas deberán de hacerse en todo el espesor de la losa colocando algún tipo de barrera de impida la adherencia de la losa con otros elementos estructurales o constructivos.

III.4.6 RECUBRIMIENTO:

Para prevenir la aparición de grietas en concreto reforzado, producidas por expansión del acero de refuerzo al sufrir corrosión debido al ataque de sulfatos y sales contenidos en el agua, debe de dejarse como recubrimiento mínimo los valores que aparecen en la siguiente tabla.

TABLA 4.3

CASO	N° VARILLA	RECUBRIMIENTO (cms)
Colado en contacto permanente con el terreno	3 al 14	7
Expuesto a tierra o intemperie	< al 5	4
	6 al 14	5
No Expuesto a tierra o intemperie		
- Losas, Muros y Trabes	14 al 16	4
	< al 11	2
- Columnas		4
- Cascarones	> al 6	2
	< al 5	1

III.5 USO DE FIBRAS

Una de las aplicaciones más comerciales del uso de fibras es la reducción de grietas por contracción y asentamientos plástico, aunque el campo y desarrollo de las mismas es mucho más amplio.

En este inciso se hará una descripción general de los conceptos relacionados al concreto reforzado con fibras, las más utilizadas, y algunas de sus características físicas, químicas y constructivas más importantes.

III.5.1 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

El concreto reforzado con fibras es un concreto hecho con cementantes hidráulicos, agregados finos y gruesos, y fibras cortas o discontinuas.

Las fibras pueden estar hechas de acero, plásticos, vidrio y algunos materiales naturales en varias formas (cilíndricas, planas, rizadas, estriadas) y tamaños, de longitudes típicas de 6 a 76 mm. y espesores variables que van de 0.005 a 0.8 mm. Un parámetro numérico útil que describe a las fibras es la relación de su longitud dividida entre su diámetro equivalente.

La tabla siguiente da una muestra más exacta de los diferentes tipos de fibras existentes, sus diámetros correspondientes, resistencia a la tensión y gravedad específica:

TABLA 4.4

FIBRA	Ø (mm)	RESISTENCIA A LA TENSION (kg/cm ²)	GRAVEDAD ESPECIFICA
ASBESTOS	0.00001-0.020	5600-9800	3.20
ALGODON	*	4200-7000	1.50
VIDRIO	0.005-1.300	10500-38500	2.50
NYLON	0.020-0.380	7700-8400	1.10
POLIESTER	0.020-0.380	7350-8750	1.40
POLIETILENO	0.020-0.380	= 7000	0.95
POLIPROPILENO	0.020-0.380	5600-7700	0.90
ACERO**	0.005-5.080	2800-28000	7.80
HENEQUEN	0.010-0.051	= 8400	1.49
CARBON	0.003-0.009	= 26600	1.90

* Se le encuentra en una gran variedad de formas y tamaños.

** Una medida más real para fibras de acero sería su ancho por su espesor.

III.6 PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO ELABORADO CON FIBRAS

III.6.1 COMPORTAMIENTO:

Quando especímenes de concreto reforzado con fibras son cargados a flexión, se observan dos estados de comportamiento en la curva de carga vs deformación. Esta curva puede considerarse de un comportamiento más o menos lineal hasta el punto -A-. Más allá de este punto, la curva es significativamente no lineal, presentando un segundo máximo en el punto -B-. El punto -A- es más bien conocido como:

Límite elástico o de proporcionalidad, mientras que el punto correspondiente en -B- ha sido llamado de resistencia última. Esto comportamiento depende de algunas variables tales como el tipo de fibra utilizada, en el caso de fibras metálicas su forma a todo lo largo o pequeño anclaje en sus extremos (geometría), cantidad utilizada, orientación de las fibras, sin olvidar claro está, la relación agua/cemento, contenido de aire, densidad, etc.

III.6.2 RESISTENCIA ESTÁTICA:

El uso de fibras metálicas en dosificación de un 4% del volumen, ha demostrado un incremento de el límite elástico a flexión del material en relación a la misma mezcla sin fibra en razón de 2.5 veces y un ligero incremento de la resistencia a la compresión. Sin embargo, el 2% del volumen se considera una dosificación adecuada por efectos prácticos de colocación en campo.

Las fibras incrementan la ductibilidad del concreto dependiendo del tipo y del contenido de fibra utilizada.

En el caso de las fibras metálicas, se ha observado que el anclaje en extremos o una forma ondulada de la fibra, puede proveer la misma resistencia que fibras de acero lisas pero con ventajas de usar un 40% menos de fibra.

Las fibras de vidrio tienen la desventaja de sufrir ataque químico debido a la alta alcalinidad del cemento hidratado, problema que se ha visto disminuido al desarrollarse fibras de vidrio resistentes a los álcalis.

Las fibras plásticas, tales como las de nylon, polipropileno, son resistentes ante agentes químicos agresivos y se ha encontrado que contribuyen a mejorar la resistencia en el concreto, tanto mecánica como al impacto.

Fibras como el algodón, henequén y poliéster, han demostrado poca resistencia al ataque químico de los álcalis del cemento entre otros y por lo tanto presentan poca efectividad en la resistencia del concreto.

III.6.3 RESISTENCIA DINAMICA:

Estudios han demostrado que las resistencia dinámica, ante efectos tales como explosiones, tensiones dinámicas, cargas de impacto, fluidos en movimiento, etc. es de un 5 a un 10% mayor que en un concreto ordinario.

III.6.4 RESISTENCIA A LA FATIGA:

Dado un tipo específico de fibras, se ha observado un aumento de la resistencia ante el efecto de ciclos de carga y descarga en función del aumento en la cantidad de fibras dosificadas en la mezcla. Se ha demostrado que la adición de fibras a vigas de concreto reforzado convencional incrementa la resistencia a la fatiga y disminuye en el ancho de las posibles grietas bajo cargas de fatiga.

III.6.5 FLUENCIA:

Algunos estudios aislados, han demostrado que el refuerzo en fibras no presenta un efecto significativo en el comportamiento de fluencia en morteros de cemento portland.

III.6.6 CORROSION DE LAS FIBRAS DE ACERO:

Pruebas de especímenes a edad temprana (90 días), que consistían en ciclos de inmersión, adentro y afuera, en una solución de agua salada, han demostrado efectos insignificantes de corrosión en morteros reforzados al 2% del total de volumen de fibras de acero.

Pruebas de durabilidad a largo plazo de concreto elaborado con fibras, muestran una corrosión mínima de las fibras y efectos no significativos en la resistencia a la flexión después de 7 años de exposición en aguas saladas. El mayor índice de corrosión por ataque de cloruros se observo en puntos cercanos a la superficie expuesta.

III.6.7 RESISTENCIA A LA ABRASION:

Se ha demostrado que la calidad del agregado y la resistencia de la superficie determina la resistencia a la abrasión, por lo que las fibras no tienen un efecto significativo en este campo. Debe hacerse notar que para este efecto, que un concreto resistente a efectos que erosionen su superficie debe de tener agregados gruesos durables y estar bien graduados.

III.6.8 CONDUCTIVIDAD TERMICA:

En este aspecto, los estudios realizados a la fecha, muestran una dispersión en el comportamiento de la conductividad térmica, ya que algunos muestran pequeños incrementos en dicha propiedad, mientras que otros muestran incrementos de un 25 a un 50% para morteros con 1 al 21% de fibras de acero en volumen, en relación con morteros ordinarios.

III.7 RESULTADOS Y OBSERVACIONES

III.7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESION

Se procedió tal como lo marca la NOM-C-109, referente al cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto y a la NOM-C-83, misma que determina lo que se refiere a aparatos y equipo a utilizar, procedimiento de prueba e interpretación de los resultados.

Los resultados obtenidos de las pruebas se muestran en la tabla 7.1 y en las Láminas A, B, C y D.:

TABLA 7.1
RESISTENCIA A LA COMPRESION. (kg/cm²)

MUESTRAS	EDAD (días)			
	7	14	21	28
TESTIGO	117.88	138.31	159.46	184.03
X1A	147.69	179.95	196.23	217.89
Y2B	154.75	202.95	217.12	236.74
Z3C	172.31	213.05	237.29	258.04

III.7.2 COMENTARIOS DE LAS PRUEBAS:

Se observa en la tabla 7.1, que la resistencia de la mezcla testigo fue muy baja, en relación a la resistencia obtenida en las mezclas de concreto con fibras y al valor de diseño. Esto de ninguna manera nos indica de que la adición de fibra a la mezcla aumente su resistencia a la compresión, si no más bien, de que como ya se esperaba, al tener deficiencias en el cemento y un exceso en la cantidad de agua de mezclado, se esperaba una variación muy considerable de resistencia en esta batchada de concreto.

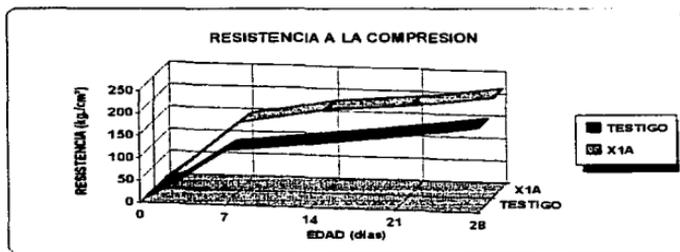
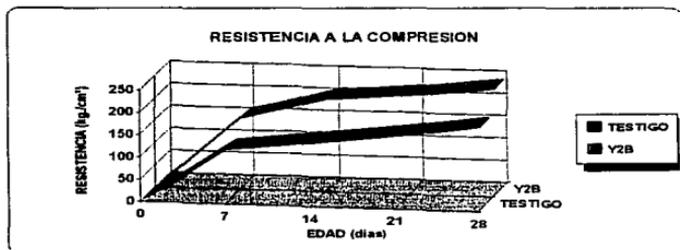
Las mezclas con fibra de polipropileno, se comportaron en forma similar, teniéndose un incremento de resistencia de aproximadamente un 16% a favor del concreto con cada una de las fibras.

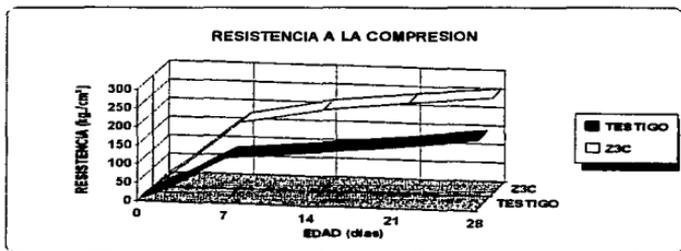
Se observa que las resistencias obtenidas a los 28 días para concretos reforzados con fibras estuvieron alrededor de un $F'c=250 \text{ kg/cm}^2$, valor de diseño de la mezcla.

Comparando este valor con el obtenido en los especímenes a los 28 días se observa un incremento en la resistencia de un 34.88% para el concreto reforzado con fibra de polipropileno y de un 42.64% para el concreto reforzado con fibra Z3C. En relación al concreto testigo, se observan incrementos de un 28.24% y de 37.2% respectivamente.

En las láminas A, B y C puede observarse que el espécimen testigo, al momento de la falla cae una disminución en la capacidad para seguir tomando carga, seguridad de un pequeño aumento que no llega a superar el primer máximo y finalmente la falla final del espécimen de prueba en forma gradual sin caer o separarse de la carga.

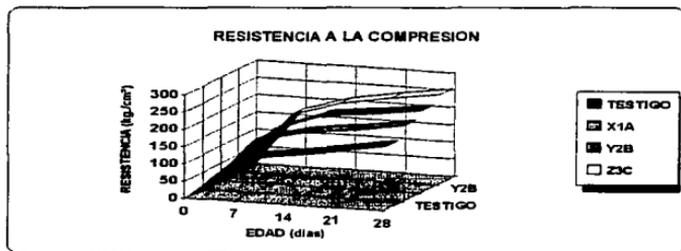
RESISTENCIA A LA COMPRESION

LAMINA ALAMINA B



LAMINA C

Obsérvense las láminas A, B, C y D donde se ilustra el resultado de las muestras



LAMINA D

III.8 EVALUACION DE AGRIETAMIENTO.

Se elaboraron 4 concretos; uno como testigo y tres con fibras de polipropileno de distintas marcas. (véase la tabla 7.1)

A) Especimen de concreto simple, sin ningún tipo de refuerzo sufrió el agrietamiento de la manera rápida. de tipo E.

B) Concreto reforzado con fibra de polipropileno X1A. Se retardo el agrietamiento reflejando de tipo A.

C) Concreto reforzado con fibra de polipropileno Y2B. Presento un ligero retardo para la observación de las grietas de tipo N.

D) Concreto reforzado con fibra de polipropileno Z3C. Es la que represento las grietas con más dificultad y son de tipo F



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CONCLUSIONES

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS
ARRAGON



CONCLUSIONES

Los factores que determinan el papel de las fibras en matrices de cemento son: la rigidez matriz-fibra, el esfuerzo de adherencia interfacial y la compatibilidad de las deformaciones matriz-fibra. Esto muestra que existen mecanismos de control de grietas y ecuaciones de espaciamiento geométrico que no explican adecuadamente el comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero. Ya que no enfocan establecer una relación entre el espaciamiento de la fibra y la resistencia flexional, las variaciones de la geometría originan una familia de curvas. Cuando consideramos fibras discontinuas cortas orientadas aleatoriamente se debe considerar la distribución de esfuerzos de adherencia interfacial debidos a transferencia de carga, o a la presencia de una grieta. Este reconocimiento se dirige a establecer una relación entre la ecuación de espaciamiento de la primera grieta y la última resistencia por flexión. Se muestra que un material aproximado compuesto y una grieta control pueden estimar satisfactoriamente la resistencia a la flexión de un concreto reforzado con fibras.

Se tiene una notable trascendencia en el mejoramiento de las propiedades resistentes de los materiales compuestos, fundamentados a partir de las experiencias empíricas que ha generado el ingenio humano en el transcurso de su historia. Las experiencias obtenidas y los éxitos logrados han estimulado su desarrollo acelerado en la práctica, tomando ventaja a la investigación y el estudio de las propiedades de estos materiales reforzados. Es común a los trabajos de laboratorio y las experiencias empíricas, buscar el mejoramiento de las propiedades mecánicas y, de resistencia de los materiales existentes, y la sustitución de aquellos que empiezan a escasear. Todo enfocado a satisfacer las necesidades apremiantes del futuro. La pronta solución de estas necesidades, aumentará las posibilidades en cuanto al C.R.F.S., de resolver los múltiples problemas de la construcción de obras de concreto.

En el desarrollo actual de estos materiales, aún está en la etapa de estudio e investigación, buscando las soluciones más representativas, que promuevan el mejoramiento de las propiedades de interacción, matriz-fibra, como una necesidad requerida, en el mejoramiento de las propiedades resistentes. Estos mejoramientos involucren la solución práctica y económica y de durabilidad a largo plazo.

Los estudios hasta ahora realizados en relación a las propiedades deseables en los materiales de cemento con fibra, las características de los agregados, con el objeto de lograr la mezcla más adecuada que deba de mezclarse con fibras y alcanzar las más altas eficiencias. El estudio de la naturaleza química y física de las fibras, como son la relación de aspecto (L/d) y los efectos de la concentración de estas, en las mezclas de concreto. La solución combinada de estos grupos de problemas, está representado por el éxito alcanzado por los productos de cemento y el significado económico y práctico que ello significa.

Las ponderaciones teóricas han establecido que los factores que determinan el papel de las fibras en las matrices de cemento son: La rigidez matriz-fibra, el esfuerzo de adherencia interfacial, y la compatibilidad de las deformaciones matriz-fibra. Bajo estas circunstancias, la deformación de la matriz, sujeta a esfuerzos, transfiere carga a la fibra, las cuales controlan el avance de las grietas que tienden a desarrollarse, creando fuerzas de apriamiento en los extremos de las grietas, retardando de esta forma su propagación a través de la matriz, propiciando un periodo de desarrollo de grietas lento y distinto. En este proceso influyen: La longitud de transferencias, la adherencia interfacial matriz-fibra y la orientación de las fibras.

Los trabajos con concreto reforzado con fibras de polipropileno, involucran problemas de trabajabilidad, especialmente a contenidos, elevados de fibra. En general las pruebas de compresión, han mostrado mejoramientos, aunque a pruebas de impacto se han obtenido excelentes resultados.

En la fabricación de elementos de concreto con fibra de polipropileno se han utilizado con cierto éxito las plantas de mezclado convencional, las propiedades más ventajosas en estos materiales, son la resistencia al impacto, peso ligero y un buen grado de ductibilidad después de la falla, grado de ductibilidad bajo carga. Las mezclas de concreto con fibra mostraron en buen grado de docilidad y trabajabilidad.

La inclusión de las fibras de polipropileno en las mezclas de concreto influyen en la pérdida de la docilidad, trabajabilidad y revenimiento de las mezclas de concreto.

La resistencia a la compresión de estos concretos, alcanzan niveles de mejoramiento a las edades de 7 y 28 días. La resistencia a la flexión tampoco muestra claros mejoramientos. Aunque se logra un buen mejoramiento en el comportamiento del material a la deformación y agrietamiento bajo carga.

Las condiciones de facilidad y trabajabilidad, con contenidos adecuados de fibra de polipropileno, la exposición prolongada de estos materiales en condiciones adecuadas de curado, mejoran considerablemente la resistencia y la compresión simple en un nivel del 16 %.

La naturaleza hidrofóbica de las fibras de polipropileno, de buena manera influyen el mecanismo de adherencia interfacial matriz-fibra, al combinarse con las mezclas de concreto de cemento hidráulico.

Dado el estado actual de investigación y estudio de los materiales reforzados con fibra, es de esperarse que en un futuro no muy distante se vea incrementado en número de aplicaciones prácticas de este material, de este material de construcción relativamente nuevo.

Las fibras de polipropileno ofrecen numerosos beneficios al concreto a un costo muy razonable. Sin embargo, estas ventajas sólo pueden ser apreciadas en el ejercicio de buenas prácticas constructivas.

Es muy importante hacer notar que las fibras pueden hacer que un concreto se mejore y que alcance todo su potencial.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

B I B L I O G R A F I A

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
C A M P U S
A R A G O N



- | | | | |
|------|--|--|------|
| 1- | ASTM C-78-75 | Resistencia a la flexión de concreto usando viga simple con carga a los tercios del claro. | 1959 |
| 2- | ASTM C-496-71 | Resistencia a la tensión de concreto (método indirecto). | 1991 |
| 3- | ASTM C-39-72 | Resistencia a la compresión simple. | 1972 |
| 4- | PORTAL PORTAL ADOLFO | Cálculo de la porción para un concreto, correcciones por humedad y absorción de los agregados.
FACULTAD DE INGENIERIA-U.N.A.M. | 1972 |
| 4- | SWAMY R.N., MANGAT P.S. and RAO C.V.SK | Thermomechanics of fiber reinforcement of Cement Matrices FIBERREINFORCEMENT CONCRETE / A.C.I. Publication SP --44 | 1974 |
| 5- | A. C. I. 211.1-70 | Prácticas recomendables para dosificar concreto de peso normal /serie /IMCYC / 2. | 1974 |
| 6- | SWAMY, R.N. and KENT B. | Some practical Structural applications of steel fiber Reinforced Concrete FIBER REINFORCED CONCRETE / A.C.I. Publication SP--44. | 1974 |
| 7. | BECKETT, R.E. | Handling and Placing fibrous Concretes FIBER REINFORCED CONCRETE / A.C.I. Publication SP--44. | 1974 |
| 8. | JOHNSTON C.D. | Steel Fiber Reinforced Mortar and Oncrete, a Review of Mechanical Propertines /FIBER REINFORCED CONCRETE / A.C.I. Publication SP-44. | 1974 |
| 9. | TAKAGI J. | Some Properties of Glass fiber Reinforced Concrete FIBER-REINFORCED CONCRETE / A.C.I. Publication SP-44. | 1974 |
| 10. | MARSH H. N. Jr., | CLARKE L. Jr.- Glas Fibers in concrete FIBER REINFORCED CONCRETE / A.C.I. Publication SP-44. | 1974 |
| 11. | SWAMY, R.N. | La tecnologia del concreto reforzado con fibras cortas para aplicaciones prácticas /REVISTA IMCYC- N° 71 / Nov-Dic. | 1974 |
| 12. | KRENCHEL HERBERT | Fiber reinforced Brittle Matrix Materials -FIBER REINFORCED CONCRETE / A.C.I. Publication SP-44. | 1974 |
| 13. | A.C.I. COMMITTEE 544 | State of the Art Report on fiber Reinforced Concrete-FIBER REINFORCED CONCRETE --publicación SP--44. | 1974 |
| 15.- | SWAMY, R.N. | Historical Development --Fiber Reinforced Cement-composites/CURSO IMCYC/ Febrero. | 1975 |

- | | | |
|-------------------------------------|---|-------|
| 16. DARDARE J. | Steel Fiber Concrete. Its use for Precasting 8TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE PRECAST CONCRETE / INDUSTRY / Stresa, italy. | 1975 |
| 17. RIVERA
VILLAREAL
RAYMUNDO | Concreto Reforzado con Fibras de Vidrio --II SIMPOSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DEL CONCRETO (MEMORIAS) / México. | 1975 |
| 18. ASTM C--192--76 | Fabricación y curado en el Laboratorio de especímenes para en sayo de compresión y flexión. | 1976 |
| 19. LEMUS DIAZ
VICENTE. | CONCRETO PLUMERIZADO-- Publicación IMCYC | 1977. |