UTILIZACION DE FIBRAS EN HORMIGONES

LA EXPERIENCIA CUBANA CON EL EMPLEO DEL FIBREQUEN

Prof. Dr. Ing. José A. Macías Mesa
Prof. Dra. Lic. María de Lourdes Artola Pimentel
Ing. Pedro J. Hernández Ramos

UTILIZACION DE FIBRAS EN HORMIGONES.

LA EXPERIENCIA CUBANA CON EL EMPLEO DEL FIBREQUEN

INDICE

Introducción	4
Capítulo I: Aspectos Fundamentales de la Utilización de Fibras en Hormigones	5
I.1 – Generalidades	5
I.2 – Clasificación de las Fibras	7
I.3 – Aspectos Fundamentales de la Teoría de los Hormigones Armados con Fibras	10
I.3.1 – Longitud Mínima de la Fibra	11
I.3.2 – Eficiencia de las Fibras (S)	13
I.3.3 – Fracción de Volumen de Refuerzo (Vf)	18
I.3.4 - Superficie Específica (Se)	19
I.3.5 – Fisuración	20
Capítulo II: Propiedades Mecánicas de los Hormigones Fibrorreforzados	22
II.1 – Comportamiento a Tracción	22
II.2 – Comportamiento a Flexión	25
II.3 – Comportamiento a Cortante	25
II.4 – Comportamiento a Torsión	25
II.5 – Tenacidad	25
Capítulo III: Propiedades Básicas de las Fibras de Acero, Vidrio y Sintéticas	27
III.1 – Fibras de Acero	27
III.1.1 – Características de las Fibras de Acero	27
III.1.2 – Campo de Aplicaciones de las Fibras de Acero	29
III.2 – Fibras de Vidrio	30
III.2.1 – Características de las Fibras de Vidrio	30
III.2.2 – Propiedades Mecánicas de los Hormigones Reforzados con Fibras de Vidrio	32

III.2.3 – Utilización de las Fibras de Vidrio	34
III.3 – Fibras Sintéticas	35
III.3.1 – Desarrollo de las Fibras Sintéticas	35
III.3.2 – Fibermesh	36
III.3.3 – Empleo de Otras Fibras Sintéticas	38
Capítulo IV: Uso de Fibras Orgánicas Como Material de Construcción	40
IV.1 – Fibras Orgánicas Más Utilizadas	41
IV.2 – Proporciones de Mezclado, Hechura y Colocación	43
IV.3 – Métodos de Mezclado y Colocación	44
IV.4 – Propiedades de las Fibras Naturales Reforzando el Hormigón	45
IV.4.1 – Estructura y Propiedades Físicas	48
IV.4.2 – Características de Resistencia	49
IV.5 – Hormigón Reforzado con Bambú	54
IV.5.1 – Selección y Tratamiento de la Superficie del Bambú	55
IV.5.2 – Relación Luz/Peralte y Esfuerzo de Diseño	56
IV.6 – Durabilidad de las Fibras Orgánicas en Hormigones	57
IV.6.1 – Referencias Acerca de las Fibras y su Durabilidad	58
IV.6.2 – Hormigón con Fibras de Sisal. Modelo de Descomposición	59
IV.6.3 – Métodos para Contrarrestar el Debilitamiento de las Fibras de Sisal en Hormigones	63
Capítulo V: Investigaciones Acerca del Comportamiento del Fibrequén en Hormigones y Morteros	66
V.1 – Reseña Histórica del Henequén	66
V.2 – Caracterización del Fibrequén	67
V.3 – Desarrollo de las Investigaciones	69
V.4 – Análisis de Hormigones y Morteros Fibrorreforzados con Fibrequén	72
V.5 – Estudio de las Propiedades Físico-Químicas y Mecánicas en Función del Tiempo de los Morteros Fibrorreforzados con Fibrequén. Método de Evaluación de la Degradación del Fibrequén a Escala de Laboratorio	77

V.6 - Análisis de Métodos para Contrarrestar el Debilitamiento	83
Capítulo VI: Empleo del Fibrequén	88
VI.1 – Recomendaciones para el Empleo del Fibrequén en Hormigones y Morteros	88
VI.2 – Reportes de Aplicación	92
VI.3 – Solución de Cubiertas y Entrepisos para Viviendas de Bajo Costo con Viguetas y Losas de Fibrequén	98
VI.4 – Ventajas Económicas de los Hormigones y Morteros Fibrorreforzados con Fibrequén	105
VI.5 – Conclusiones Parciales	106
Capítulo VII – Conclusiones Generales Acerca de la Investigación y Empleo de los Hormigones y Morteros Fibrorreforzados con Fibrequén	107
Bibliografía	109
Tablas y Gráficos	118

INTRODUCCION

…el profesor James Romualdi, uno de los pioneros en la construcción de materiales con fibras de acero, señala que una de las primeras referencias al uso de las fibras como refuerzo de materiales de construcción, aparece en la Biblia.

Moisés y Aarón pidieron al Faraón permiso para traer a los israelitas del desierto durante tres días para trabajar en la construcción. El Faraón negó la petición, es más los castigó, alertando a sus cuadros dirigentes, “No debemos dar al pueblo paja, hierba para hacer ladrillos; démosle paja, hierba para ellos mismos”. (Éxodo, Capítulo 5, Versículo 7).

Obviamente ese material con el cual se ligaba la paja, la hierba, no era hormigón. Debieron pasar miles de años para que esa especie de matrimonio fructificara. El Profesor Romualdi patentó en 1969 en los Estados Unidos (3,429,094) el uso de fibras cortas y finas de acero para reforzar el hormigón.

Otros destacados especialistas en otros países acudieron a las fibras orgánicas para el susodicho enlace.

El Ing. José Macías, en Cuba, en 1985 acudió a las fibras de henequén: el Fibrequén. El es también pionero y el también tiene una patente: una patente cubana.

Prof. Francisco Medina Torri

CAPÍTULO I: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA UTILIZACIÓN DE FIBRAS EN HORMIGONES.

I.1 - Generalidades.

El objetivo supremo de todo especialista dedicado a la construcción es lograr que sus obras sean resistentes, duraderas y lo más económicas posibles, amén de bellas. Por esto es necesario que las obras estén construidas con materiales que también cumplan con esta máxima: resistentes, duraderas y económicas.

El descubrimiento del hormigón hidráulico en el siglo XIX ha marcado pautas en el desarrollo constructivo, dadas sus ventajas fundamentales de:

- Poseer alta resistencia a la compresión en estado endurecido.
- Laborabilidad adecuada que permite su colocación bajo disímiles condiciones de moldeo, con lo que la forma no es un impedimento constructivo.
- Ser económico dada la composición del mismo, con áridos gruesos y finos, un material conglomerante, fundamentalmente el cemento Pórtland y agua.

Otras muchas ventajas son propias de este material y desde su creación se trabaja, estudia e investiga para lograr mejorarlo. Posee también desventajas, y la fundamental ha sido su debilidad a resistir tracciones, lo que planteó un sin número de limitaciones hasta que apareció el hormigón armado.

El hormigón armado se convirtió en el material constructivo por excelencia del siglo XX y resuelve un universo grande de problemas, pero aún posee sus restricciones ligadas básicamente a la no homogeneidad del material. Su alto peso específico se convierte en freno básico para su primacía en el siglo XXI.

El empleo de fibras viene a incidir en la búsqueda de soluciones para mejorar la calidad de hormigones a partir de poseer propiedades tensomecánicas satisfactorias y ser un material homogéneo de emplearse fibras cortas discontinuas.

Desde épocas ancestrales el hombre usó fibras para conseguir abrigo, construyendo sus casas de pajas, luego de adobe, con el empleo de diferentes materiales orgánicos que tomó de la naturaleza, incluyendo la madera, por lo tanto ha estado familiarizado con el uso de fibras y a principios del pasado siglo las retoma, pero esta vez para mejorar propiedades básicas de los hormigones.

Es en Estados Unidos donde en la primera década del siglo XX se comienzan los estudios acerca de las características físico-mecánicas del hormigón masivo al cual le fueron introduciendo “clavos picados” y pedazos de piezas metálicas. Se destacan los estudios realizados por Porter en 1910 y ya en 1911 Graham propone la utilización de fibras de acero para mejorar en el hormigón la resistencia y la estabilidad. La primera patente data de 1914, en Estados Unidos, dada a William Ficklin para proteger la invención de un hormigón resistente a la figuración y al desgaste, obtenido añadiéndole virutas metálicas a la matriz de hormigón.

Entre las dos guerras mundiales los estudios se incrementaron y la primera gran obra donde se usan fibras de acero se le atribuye al Arq. Ing. Pier Lugi Nervi, llamado el padre o redescubridor del ferrocemento, cuando construye la cúpula del Palacio de los Deportes de Roma en 1946.

Pero no es realmente hasta la década de los pasados 60, con los estudios llevados a cabo por James Romualdi en Estados Unidos, en que podemos decir que se inicia la verdadera investigación científica de las fibras cortas mezcladas con el hormigón. En este momento sucede, de manera interesante, una diversificación mundial de las fibras a estudiar en su interacción con los hormigones, basada fundamentalmente por las fibras que geográficamente se encuentren a disposición del hombre. Se validan las ventajas relativas de cada fibra y se despierta el quehacer de muchos científicos como el inglés Swamy y el sueco Gram. Se retoman las fibras orgánicas.

El American Concrete Institute (ACI) en Estados Unidos crea el Comité 544 para el estudio, análisis y seguimiento de los hormigones fibrorreforzados (FRC, por sus siglas en inglés) y el Comité 549 para el Ferrocemento. En Europa aparecen grupos de estudios, a principios de los pasados años 90 para el análisis del comportamiento estructural en conglomerados cementicios

fibrorreforzados y se trata de normalizar el empleo de los hormigones fibrorreforzados.

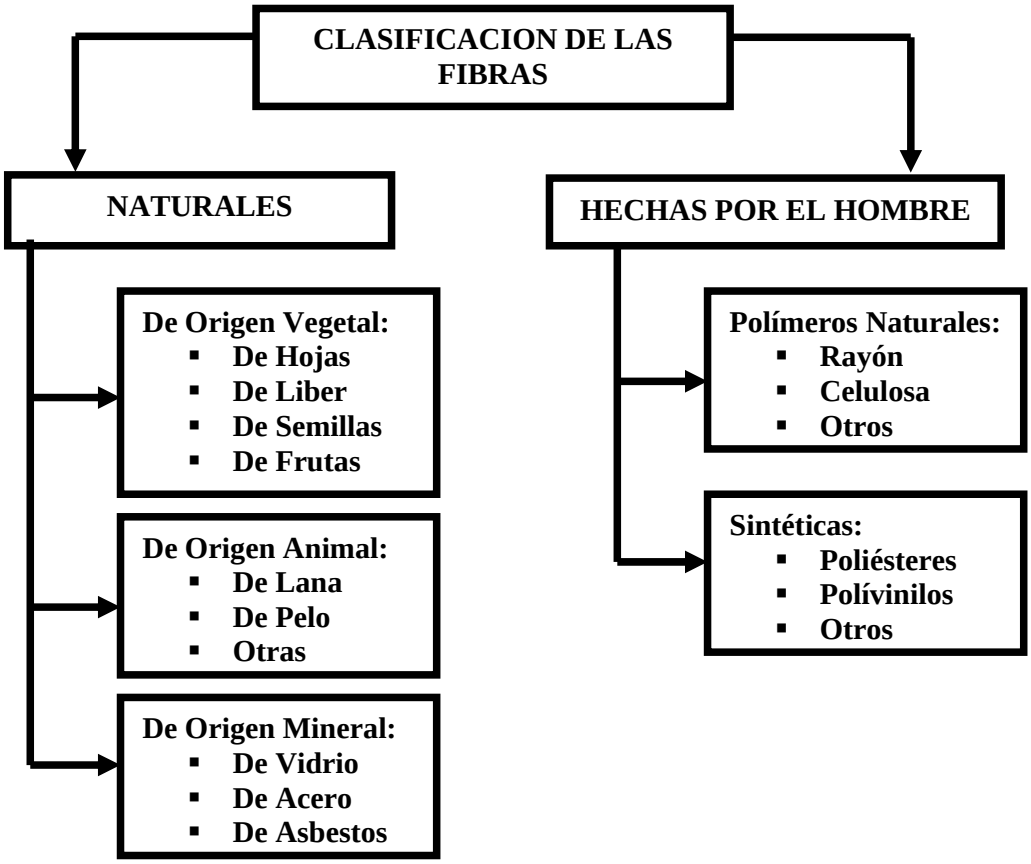
Las convenciones del ACI en Atlanta (Febrero de 1989) y San Diego (Noviembre de 1989) analizan los resultados presentados por los Comités 544 y 549 y ve la luz la publicación especializada “Thin-Section Fiber Reinforced Concrete and Ferrocement”, recopilada por J. I. Daniel y S, P. Shah como primer, concreto y loable empeño, de confrontación científica de la labor realizada en fibras sintéticas, fibras de vidrio, fibras de acero, ferrocemento y otras secciones compuestas.

A su vez la Universidad Federal de Bahía, Brasil, organiza en 1990 el Segundo Symposium sobre Plantas Vegetales y sus Fibras como Material de Construcción, donde con un sentido dirigido más hacia los países pobres se analizan las propiedades de los materiales compuestos con fibras vegetales, las construcciones realizadas con el empleo de materiales compuestos con fibras, madera, secciones completas de plantas y desperdicios orgánicos. Punto de despegue para el debate público especializado de lo realizado sobre los tópicos denominados Fibres Naturals Reinforced Concrete (NFRC, por sus siglas en inglés).

En los últimos años, el análisis y debate del empleo de los hormigones fibrorreforzados ha ganado en actualidad y está presente, por derecho propio, en los foros nacionales e internacionales del sector de la construcción.

I.2 - Clasificación de las Fibras.

Existen diversas clasificaciones para las fibras, considerando la más viable las que las divide en Naturales y Hechas por el Hombre.

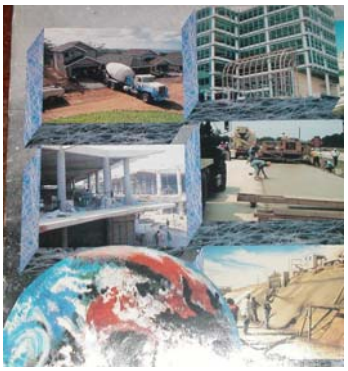


Referidas a las empleadas en hormigones y morteros tenemos:

- Dentro de las hechas por el hombre resaltan:
    - Celulosa. Se estudia y emplea dentro de morteros fundamentalmente. Mundialmente se trabaja intensamente para lograr la sustitución parcial o total de asbestos por la misma.
    - Polívinilos. Se han investigado muchos tipos siendo el único que ha pasado las pruebas satisfactoriamente en cuanto a durabilidad en el medio cementicio son los que poseen por base el polipropileno. Entre estos destacan: Fibermesh (Estados Unidos), Harbourite (Estados Unidos), Fibercom (México) y Reforcreto (México).
- Considerando las fibras naturales tenemos:
    - Las de origen animal se han empleado poco, sólo las de pelo de caballo a principios del siglo XIX en Estados Unidos y los resultados no fueron halagüeños. Se han desechado.

- Las de origen mineral son ampliamente difundidas, siendo las de asbesto las de más uso en la diversidad de productos que se agrupan en la llamada línea de los asbestos-cementos y entre ellas están las tejas, planchas lisas, tanques y tuberías. Presentan dos problemas básicos, el primero no ser un producto renovable y el acelerado ritmo de empleo (en 20 años se cuadriplicó el consumo) ha motivado que las reservas disminuyan sensiblemente y el segundo problema básico está referido a la confirmación por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Internacional del Trabajo (OIT) que demuestran la relación existente entre la exposición al asbesto y ciertos procesos del tipo de la asbestosis, al relacionarse con una acción carcinogénica tanto para el ser humano como para los animales. El tipo de crocidolita se considera que es un carcinógeno más enérgico que el asbesto blanco (crisolito, antofilita, tremolina y actinolita) o marrón (amosita). Diferentes países, básicamente del primer mundo han prohibido su uso y empleo, en otros se han dictado reglamentos para el uso controlado del asbesto y los productos que lo contengan. A este criterio se oponen los fabricantes de productos de asbesto-cemento los que aseguran que con las adecuadas medidas de protección e higiene la salud humana no corre peligro.
- Las primeras fibras de vidrio se producen a finales de los años 60 en Gran Bretaña y comercialmente salen al mercado en 1971 bajo la denominación de CEB-FIL, y como problema básico presentaron la alta degradación ante el ataque alcalino, por lo que hubo una segunda generación, CEN-FIL 2 en 1985, donde las fibras son recubiertas como protector. Son un recurso no renovable y de alto costo de fabricación. Las tecnologías de producción se han desarrollado extraordinariamente, diversificándose el empleo de las fibras de vidrio hacia otras ramas de la economía y no precisamente en el sector de la construcción.

- Las fibras de acero son probablemente las primeras en ser utilizadas, muy difundidas, de probada eficacia, fundamentalmente en los Estados Unidos y países del primer mundo. Requieren de una alta tecnología de la industria sidero-mecánica para ser producidas. Acaparan un alto por ciento de las investigaciones realizadas a los hormigones fibrorreforzados en su historia. Su mayor desventaja está en su interacción matriz cementicia-acero.
- En cuanto a las de origen vegetal principalmente se trabaja con fibras de la corteza o de hojas como son las de sisal, henequén, kenaff, yute, caña, coco y otras. Existen muchos temores en su empleo, dejando casi la exclusividad de construir con las mismas a los países pobres y de manera empírica, sin profundas investigaciones científicas, dada su alta degradación en el medio cementicio. De resolverse que aumenten su durabilidad en función del tiempo son las que mejor relación presentan entre las propiedades mecánicas y el costo de fabricación con ellas.



Cualquiera que sea el tipo de fibra estas le brindan a los hormigones y morteros un refuerzo tridimensional que implica mejoras en las propiedades del elemento resultante. Las propiedades fundamentales que mejoran están asociadas a la resistencia a la tracción así como la eliminación, casi total, de la fisuración y se busca que los elementos constructivos resultantes tengan un balance satisfactorio entre las propiedades mecánicas obtenidas y el costo de fabricación.

La diferencia que existe al usar las fibras de metal con las de material sintético o las naturales es amplia, se requiere entonces de estudiar el tipo de fibra, su naturaleza, y tratar de lograr criterios uniformadores.

I.3 - Aspectos Fundamentales de la Teoría de los Hormigones Armados con Fibras.

Al usar fibras discontinuas, ‘éstas se dispersan dentro de la matriz de manera casual y tendiendo a la tridimensionalidad, a diferencia de las continuas que requieren una orientación prefijada; también se les denomina fibras cortas y largas.

Como criterio uniformador el ACI ha propuesto y se ha generalizado la denominada Relación de Forma o Aspecto Definido, que no es más que la relación existente entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente (lf/de).

La forma tiende a lo circular normalmente, aunque en algunas fibras como las de polímeros hechas por el hombre son planas, siendo dicho diámetro o el equivalente como relación de superficie, básico para la adherencia fibra-matriz, también interesa la naturaleza de la fibra.

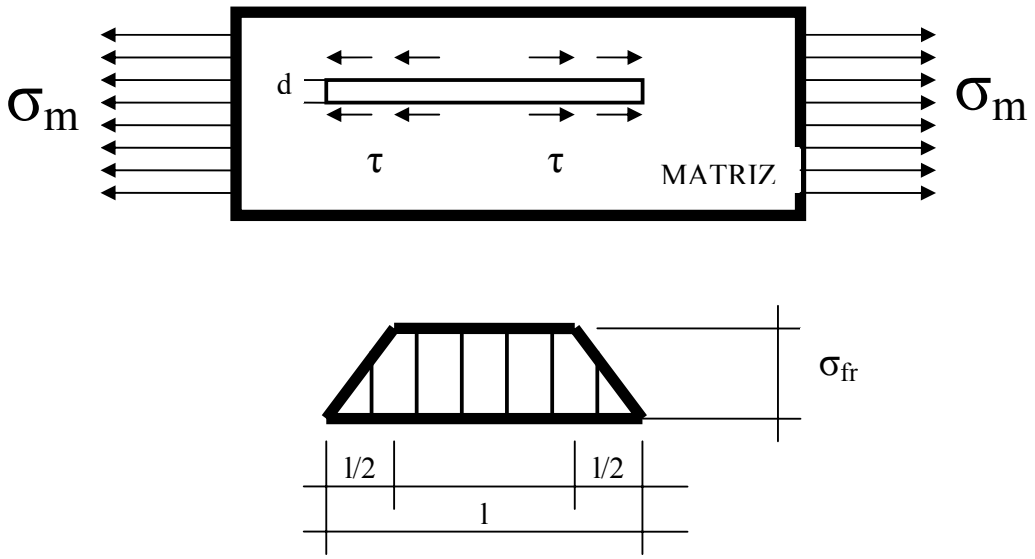
Las características físico-mecánicas de un conjunto importante de diferentes fibras se muestran la Tabla No. I. Las consideraciones fundamentales son:

- Los diámetros no son estables, incluso presentan variaciones altas para un mismo tipo de fibras.
- Las densidades están acordes al tipo de material.
- La resistencia a la tracción es casi igual para todas las fibras, observándose los valores mayores en las inorgánicas.
- El módulo de elasticidad de las fibras orgánicas es muy bajo, lo que posibilita que se obtengan grandes deformaciones, aspecto muy vinculado a los altos valores de elongación a la rotura de este tipo de fibras.
- En la última columna se aprecia el denominado Coeficiente de Calidad (resistencia a tracción/densidad aparente) el cual trata de uniformar la eficiencia de las fibras. Desde este punto de vista las m s eficientes son las de carbón, vidrio y poliésteres.

Los aspectos teóricos que tratan de modelar el comportamiento de las fibras en la matriz están básicamente referidos a:

I.3.1 - Longitud Mínima de la Fibra.

Para determinar el trabajo del material como un todo se parte de establecer las condiciones de equilibrio en una porción de la matriz fibrorreforzada en que sólo exista una fibra orientada en la dirección de los esfuerzos de tracción, teniendo:



La transmisión de los esfuerzos de la matriz a la fibra se realiza a través de los esfuerzos tangenciales unitarios de adherencia (τ), las tensiones normales crecen en la medida que aumenta la longitud de la fibra desde cero hasta el valor en que se rompe (σ_{fr}), al ser muy superiores los esfuerzos normales (σ_m) a las posibilidades de resistir a partir de los esfuerzos tangenciales unitarios.

Aplicando el equilibrio estático en un elemento diferencial de fibra circular, dl, obtenemos la ecuación:

$$\langle\left(\pi d^2\right)/4\rangle d\sigma_f = \pi d\tau_m dl \qquad (1)$$

Integrando (1) entre 0 y l se obtiene que:

$$l_c = \left(d\sigma_{fr}\right)/2\tau_m \qquad (2)$$

ecuación válida para $\tau < \sigma_{fr}$ y a su vez:

lc : longitud crítica de la fibra para la cual el esfuerzo unitario en la fibra se iguala al esfuerzo unitario de rotura.

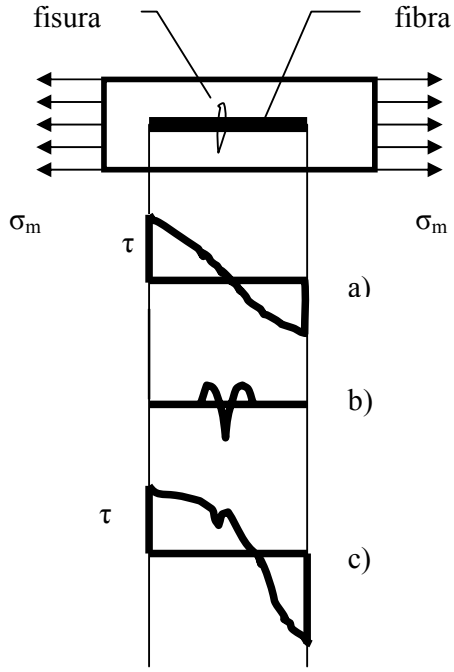
τ_m : esfuerzo unitario medio de adherencia.

d : diámetro medio de la fibra.

La longitud crítica (lc) va a depender directamente de los esfuerzos medios de adherencia (τ_m); cuando la adherencia se destruye comienza el movimiento relativo de la fibra respecto a la matriz y con éste empiezan a actuar las fuerzas de rozamiento, realmente pequeñas y dependientes de la superficie de la fibra.

Como vemos este comportamiento idealizado responde a la condición de orientación coincidente de la posición de la fibra con los esfuerzos traccionantes.

Cuando aparecen grietas o fisuras en la matriz la situación de los esfuerzos tangenciales unitarios de adherencia es:



a) Representa la distribución de los esfuerzos tangenciales unitarios de adherencia antes de la aparición de la fisura.

b) Esfuerzos unitarios de adherencia debido a la fisura.

c) Efecto combinado de los dos diagramas anteriores debido a la aparición de fisuras, se produce la discontinuidad en el diagrama, entonces los esfuerzos unitarios de adherencia se reducen.

Referente al largo mínimo de las fibras existen dos criterios básicos:

1ro.- Argón y Shack plantean: $l = 2\ lc$ (3)

Su razonamiento está basado en:

- Al aparecer la fisura en la matriz la fibra la intercepta y la mas pequeña de las dos partes empotradas es la más importante para el comportamiento postfisura.
- el valor probabilísticamente más pequeño en que la fisura divide a la fibra es l/4.
- Si l/4 < lc/2 se desprende la fibra de la matriz al romperse el equilibrio estático.

2do.- Otros autores recomiendan, estando del lado de la seguridad, emplear l > 2lc, entonces después de aparecer la primera fisura el material fibrorreforzado puede soportar un nuevo aumento de los esfuerzos unitarios y por tanto un buen comportamiento postfisura.

Considerando los criterios de Argón y Shack y dado que las deformaciones unitarias transversales (et) de la fibra y la matriz son iguales al trabajar como un todo se tiene que:

$$lc = [\ (d\sigma_{fr})/(2\tau_m)\ ] \quad (1) \qquad \text{y} \qquad \sigma_f = E_f * e_t \quad (4)$$

obteniéndose entonces el largo mínimo de la fibra para que ésta no se desprenda al aparecer la primera fisura y que es:

$$l = d\left[(R_t / \tau_m)(E_f / E_b)\right] \quad (5)$$

donde:

R_t : esfuerzo unitario en el hormigón.

E_f y E_b : módulos de elasticidad de primer orden de la fibra y de la matriz

La relación de forma no sería más que:

$$l / d = \left[(R_t / \tau_m)(E_f / E_b)\right] \quad (6)$$

Esta relación de forma es dependiente de: tipo de fibra, naturaleza de la superficie de la fibra y características físico-mecánicas de la matriz.

Como limitaciones en su aplicación práctica están:

1. El supuesto teórico de partida de orientación coincidente en las direcciones de la fibra y los esfuerzos de tracción no es válido para fibras discontinuas

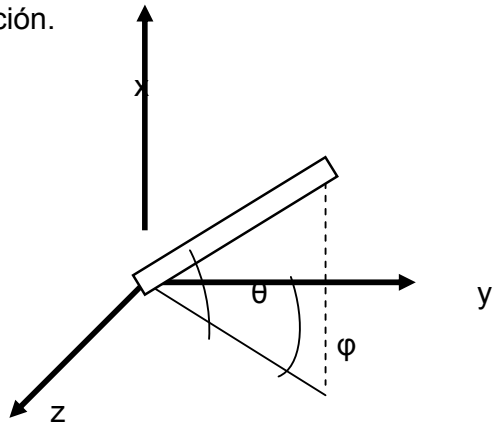
en la matriz cementicia en lo general, sino sólo para una pequeña porción de las fibras.

2. No considera la dispersión real de las fibras dentro de un elemento a construir. Se recomienda que debe tomarse una longitud de fibra que no sea superior a un tercio de la menor dimensión del elemento a construir.

I.3.2 - Eficiencia de las fibras (S).

Se define como la distancia entre los centros de gravedad de las fibras. Los autores de este concepto demostraron que la resistencia a la tracción en el instante en que aparece la primera fisura para un determinado volumen de fibras es inversamente proporcional con el intervalo geométrico existente entre las fibras. Por tanto estamos ante un criterio definitorio para determinar la resistencia al aparecer la primera fisura.

Para calcular la eficiencia se parte de n fibras distribuidas de manera casual ocupando el volumen conocido, y se toman las paralelas a los esfuerzos de tracción.



$$l_x = l\cos\theta\cos\varphi \qquad (7)$$

siendo la longitud media de n fibras:

$$l_{mx} = \left(n\iint l\cos\theta\cos\phi d\theta d\phi\right)/\, n(\Pi/2)^2 \qquad (8)$$

$$lmx = 0.41l \qquad (9)$$

Resultando entonces que sólo el 41 % de las fibras se encuentra orientada en la dirección de los esfuerzos a tracción. Esta probabilidad deducida por Romualdi y Mandel no ha sido aceptada de manera general. Siguiendo el método anterior de análisis la eficiencia de las fibras para diferentes modos de orientación es:

- En una sola dirección : 100 %
- Ortogonal en el plano : 40 - 50 %
- Casual en el plano : 30 - 40 %
- Casual en el espacio : 41 %

cuestión esta no coincidente con la realidad práctica demostrada incluso mediante técnicas fotográficas.

En 1964 Romualdi y Mandel plantean para calcular S considerar un volumen de hormigón (Vb) armado con n fibras, de manera tal de que para una distribución espacial:

$$S = \sqrt[3]{V_n / n} \qquad (10)$$

llegando a demostrar que el intervalo de las fibras orientadas en la dirección de los esfuerzos a tracción es:

$$S = 13.8d / \sqrt{V_f} \qquad (11)$$

siendo Vf el por ciento volumétrico de fibras.

Este análisis es estrictamente geométrico, no real y sólo válido para una respuesta de distribución cuadrática.

Krenchel estudió las diferencias que pueden aparecer con las diferentes orientaciones de las fibras:

Cuadrada Triangular Hexagonal

$S_c = \sqrt{1/nx}$ (12) St = 1.075 Sc (13) Sh = 0.877 Sc (14)

Como puede observarse, la misma cantidad de fibras en una misma área según la orientación difieren. Tomando como base la cuadrada, el intervalo entre las fibras de la triangular es un 7 % superior y el de la hexagonal un 12 % inferior.

El análisis anterior, limitado por consideraciones estrictamente geométricas tampoco da respuesta al comportamiento postfisura y responde sólo cuando aparece la primera fisura.

Swamy profundiza en el concepto de intervalo fibras y su dependencia entre las fibras y la matriz así como el modo de ruptura. Para establecer S toma en consideración dos factores:

- Distribución de los esfuerzos unitarios de adherencia.
- Presencia de la fisura.

Introduce entonces la eficiencia de la adherencia a través de los coeficientes:

- nl : influencia en la longitud de la fibra.
- nd : influencia del di metro de la fibra.

Suponiendo una distribución cuadrada de las fibras en la sección transversal de una matriz cúbica con lado L, el intervalo efectivo de fibras que se encuentra en la dirección del esfuerzo unitario es:

$$S = \sqrt{L^2}/nx \qquad (15)$$

donde nx es el número de fibras en la dirección x.

Evaluando para el caso particular de fibras de acero se tiene:

$$S = \alpha\sqrt{d}/V_f l \qquad (16)$$ para el estado en que aparece la primera fisura.

$$S = \beta\sqrt{d}/V_f l \qquad (17)$$ para el estado de ruptura.

Otros investigadores han expresado sus criterios acerca del intervalo geométrico de las fibras y Mckee lo hizo considerando que las fibras son distribuidas uniformemente en el espacio por lo que S es igual en todas las direcciones siendo:

$$S = \sqrt{Vl}/\mu \approx 4.3\sqrt{d^2(l)}/p \qquad (18)$$

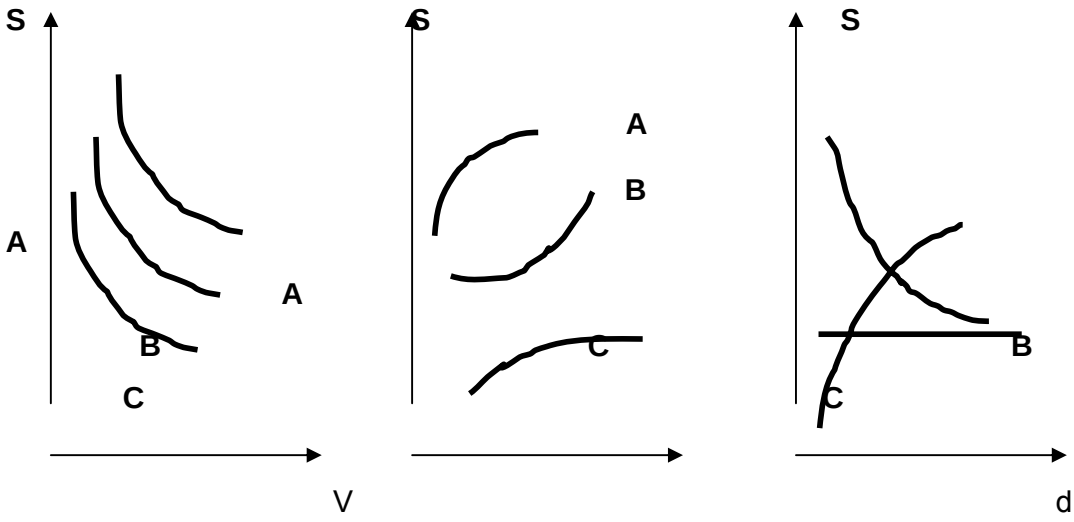
Graficando los resultados obtenidos por Romualdi, Swamy y Mckee, para fibras de acero y en función de determinar el intervalo entre las fibras (S) tenemos:

l : mm

, v : %

S : mm

, d : mm



d = 0.25 mm, l = 25 mm l = 25 mm, v = 2 % d = 0.25 mm, v = 2 %

siendo, A : Mckeee (18), B : Romualdi (10) y C : Swamuy (16).

Como puede observarse los resultados son disímiles y esto está dado porque fueron estudios realizados estrictamente sobre bases geométricas y de manera aproximada.

Prácticamente se recomiendan los estudios sobre la base de pruebas de rayos x efectuadas a muestras reales y se determina S experimentalmente. No obstante los estudios realizados han sido fundamentalmente en Estados Unidos e Inglaterra, con técnicas de ensayos costosas y enfocados a las fibras de acero, de ahí que estos estudios se tomen como válidos en una primera aproximación y se extiendan a otras fibras.

En el caso de las fibras orgánicas, trabajadas por países pobres casi exclusivamente y de manera empírica, no se aplican consideraciones teóricas al respecto.

De manera experimental se define el intervalo entre las fibras, Sexp, como la distancia media entre la intercepción de la proyección de las fibras individuales en un plano con base lineal de longitud lb dibujado sobre el mismo plano,

Sexp = lb/nb (19)

Pudiendo concluir al respecto en que:

1ro.- La eficiencia de las fibras es un par metro importante para precisar las características mecánicas del hormigón fibrorreforzado.

2do.- La forma de cálculo de S no está definida estrictamente, estando dada en lo fundamental por:

- Parámetros de orden geométrico, a saber por ciento volumétrico de armadura (cantidad de fibras), diámetro de la fibra y la orientación de dichas fibras.
- Consideraciones de esfuerzos unitarios sobre el material fibrorreforzado. En la realidad, en muy pocos elementos los supuestos de dirección concordante de esfuerzos de tracción y orientación de las fibras se dan.

I.3.3 - Fracción de Volumen de Refuerzo (Vf).

Se define como el resultado de la división del volumen ocupado por el refuerzo, en este caso las fibras, entre el volumen de hormigón o mortero.

$$V = (volumendefibras)/(volumendehormigón) \qquad (20)$$

pero, masa de la fibra entre el volumen de hormigón es igual a la dosis de la fibra, por tanto,

$$Voldehormigón = (masadefibra)/(dosisdefibra) \qquad (21)$$

además PUS = masa de fibra / Vol de fibra, de donde,

$$Voldefibras = (masadefibras)/(PUSfibras) \qquad (22)$$

sustituyendo (22) y (23) en (20) obtenemos:

$$V_f = [\ (dosisdefibra)/\ PUS_{fibra}\ ] * 100 \qquad (23)$$

siendo el peso unitario suelto de la fibra la resultante de la masa de dicha fibra entre el volumen de la misma.

Teniendo entonces que se asevera que la fracción de volumen es dependiente del tipo de fibra, en función de su peso unitario y del di metro de la misma, además de la cantidad de fibras que se encuentre en la mezcla. No depende de la longitud de la fibra.

I.3.4 - Superficie Específica (Se).

Se define como la relación existente entre el área superficial del refuerzo, en este caso fibras, y el volumen de hormigón o mortero.

$$S_e = A_s / Volhormigón \qquad (24)$$

Si el volumen de fibra es el área de una fibra por la longitud total de fibras, además:

$$l_t = Volfibra / áreadeunafibra \qquad (25)$$

$$A_s = \pi d l_t \qquad (26)$$

tendremos entonces que:

$$A_s = 4Volfibra / d \qquad (27)$$

Trabajando con las ecuaciones (21), (22), (24) y (27) obtenemos:

$$Se = 4V_f / d \qquad (28)$$

Ecuación coincidente con la planteada para ferrocemento en su combinación de un producto ferroso con cemento y donde se destaca que la superficie específica depende del tipo de fibra (en función del diámetro) y de la fracción de volumen, pero es independiente de la orientación del refuerzo.

Los valores recomendados para la superficie específica de los materiales compuestos se encuentran entre 0.3 y 3 cm^{-1}.

Adicionalmente como se conoce la longitud de las fibras usadas (lf) puede conocerse cuántas fibras hay dispersas en la masa de hormigón y mortero.

Partiendo de (24) y (26) se llega a obtener la cantidad de fibras en un volumen dado de hormigón o mortero y que no es más que:

$$N = \left[4\left(Dosisfibra\right)Vhormigón\right]/\left(\pi dl_f PUSfibra\right) \qquad (29)$$

y para un volumen unitario queda,

$$N = V_f /\left(A_f l_f\right) \qquad (30)$$

I.3.5 - Fisuración.

La formación de grietas es uno de los mecanismos más interesantes dentro de los materiales compuestos y cuando estos son hormigones y morteros fibrorreforzados se persigue la detención de la propagación de la grieta al interceptar la fibra la fisura, siendo válidas las declaraciones de Nervi :

"El concepto de este material se basa en la elemental y conocida observación de que la elasticidad de un elemento de concreto reforzado, aumenta en proporción a la subdivisión y distribución del refuerzo a través de la masa",

por tanto cobran singular importancia los materiales compuestos con fibras cuya orientación sea casual tendiente a la tridimensionalidad, lo que hace a dicho material mucho más homogéneo que los hormigones armados tradicionales.

En el momento del agrietamiento el esfuerzo ante la primera grieta puede obtenerse utilizando la fórmula empírica de Naaman debido a que es una función de la superficie específica del refuerzo e independiente de la orientación del mismo:

$$\sigma_{cr} = 2.4Sel + \sigma_{mu} \quad (kg/cm^2) \qquad (31)$$

donde: Sel = superficie específica del compuesto ante la primera grieta.

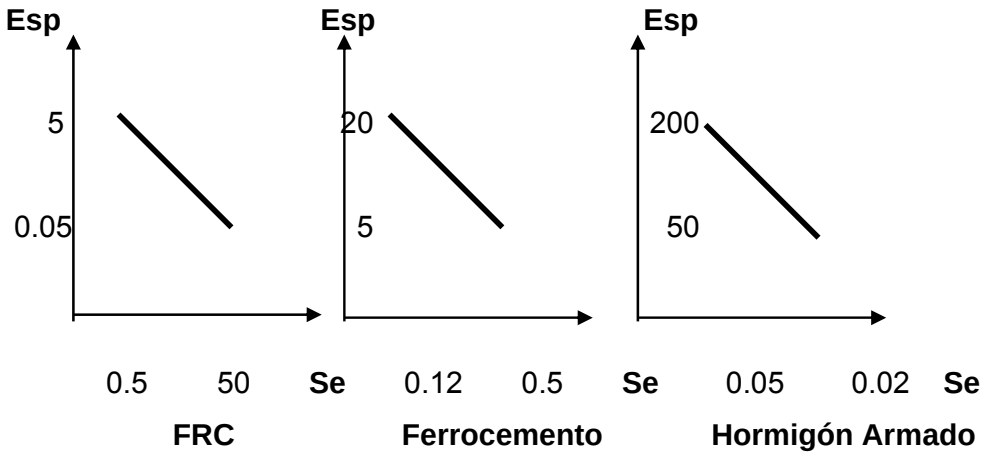
σmu = resistencia última a la tensión de la matriz.

Romualdi y Mandel demostraron que el esfuerzo de agrietamiento es inversamente proporcional a la separación entre las fibras para cualquier fracción de volumen de refuerzo.

Haciendo un análisis del espaciamiento entre fisuras de diferentes materiales tenemos:

Se : mm^{-1} ,

Esp : mm



presentando los menores espaciamientos en los fibrorreforzados lo que tiene relación directa con que se posean anchos de grietas muchos menores.

El agrietamiento es directamente proporcional al diámetro de las fibras, ya que a mayor di metro mayor separación entre las fibras y a su vez es inversamente proporcional a la fracción de volumen (Vf), la superficie específica (Se), la longitud de fibras (lf) y la distancia desde el refuerzo hasta la cara exterior del elemento. En las FRC y referido al hormigón armado las distancias entre las grietas son menores, la cantidad de grietas es mayor pero la abertura de las grietas es menor lo cual es satisfactorio.

CAPÍTULO II - PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES FIBRORREFORZADOS.

Las propiedades mecánicas de los hormigones fibrorreforzados de mayor interés son aquellas asociadas a la tracción, la flexión y el cortante, dado que el hormigón por si solo resiste muy bien las compresiones.

II. 1 - Comportamiento a Tracción.

Está determinado por los factores orientación de la fibra, relación de forma, volumen y eficiencia.

Haciendo un análisis de la influencia de cada uno de los anteriores factores tenemos:

- Orientación de la fibra.

Parámetro asociado con la longitud de la fibra y su geometría en una determinada área, está vinculado directamente a la resistencia a la tracción y los criterios de cómo se produce dicha vinculación son disímiles.

La orientación de la fibra dentro del conglomerado, cuando no es prefijada antes del hormigonado, es prácticamente incontrolable, siendo casual en fibras discontinuas como hemos planteado.

La longitud propiamente de la fibra posee su mayor influencia en el decrecimiento de la fisuración y no en el aumento de la resistencia a tracción.

- Relación de forma.

Longitud y diámetro de la fibra van a estar muy vinculados en un rea determinada y con el aumento de los volúmenes de fibra para relaciones lf/df se aprecia un aumento en la resistencia a tracción.

El aumento de la relación de forma, incluso en determinadas condiciones de utilización de una única fibra con diámetro fijo y hasta ciertos límites ligados a las condiciones de mezclado provoca mayor capacidad de resistir tracciones.

- Volumen de fibras.

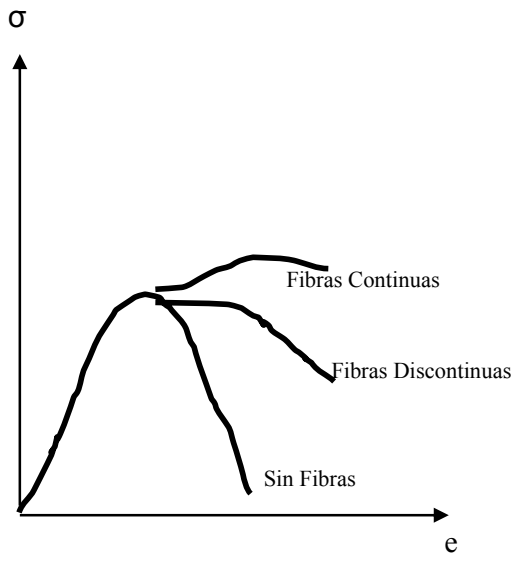
El aumento del contenido en volumen de fibras conlleva a un aumento proporcional de las resistencias a tracción.

Este criterio esta altamente difundido. Consideramos no debe absolutizarce dado que no contempla factores como la durabilidad y la dureza propia de la fibra.

- Eficiencia de las fibras (S).

Por su importancia analizada con anterioridad. Desde 1991 la propuesta de norma italiana "Comportamiento Estructural en Conglomerado Cementicio Fibrorreforzado" y que se encuentra a tono con la unificación normalitizativa de los países miembros del Mercado Común Europeo plantea utilizar (11) para la distancia media y en el caso de (16) y (17) los coeficientes numéricos 25 y 27, que dependen de la adherencia fibra-matriz para el acero, tomarlos como válidos para cualquier tipo de fibra. Esta situación está dada por la falta de estudios específicos de otras fibras y por la poca variabilidad que pudieran tener realmente dichos coeficientes numéricos.

Referido al comportamiento de las tensiones normales ante incrementos de las deformaciones unitarias tenemos que:



En el caso de los hormigones fibrorreforzados hay un comportamiento postfisura singular, caracterizado por:

- No colapsa de inmediato.
- Las tensiones últimas de rotura son mayores y se producen deformaciones altas.
- Resiste aumento de cargas después de la primera fisura, básicamente al emplearse fibras continuas.

Es necesario significar que en el caso de materiales fibrorreforzados la posición de la curva (no su forma) dentro del grafico σ - e va a depender del volumen de fibras que contenga la matriz. Así tenemos que se determina el volumen crítico,

definido como el volumen de fibras mínimo (Vfmin) necesario para que después de la ruptura por tracción de la matriz el compuesto pueda todavía soportar aumentos de cargas y obtener altas tensiones normales últimas (σ_{tu}). Por tanto debemos trabajar en lograr la unidad en la relación del volumen real de fibras y el volumen crítico con miras a lograr optimizar un material más resistente.

Considerando la modelación del comportamiento a tracción se precisan dos instantes: antes y después de la fisura. El comportamiento prefisura se puede considerar el elástico y si se analiza por las teorías de la Mecánica de la Fractura se obtiene:

$$Vfcr = \left(\pi^3 / 34\right)\left\{ \left[(1-\mu m)^2 \sigma mu^2 d^2 \right] / EmT \right\}^2 \qquad (32)$$

donde: μ : Coeficiente de Poisson del material.

Em : Módulo de elasticidad de primer orden del material.

T : Energía propia del material.

El comportamiento postfisura es analizado considerando al hormigón, el cual va a presentar una fisura cuyo valor inicial es cero y va a ir creciendo de manera tal que la fibra va a interceptar dicha fisura, que no es m s que la relación de continuidad del material ante las tensiones internas que existen. Al interceptar las fisuras, las fibras comienzan a aportar su capacidad intrínseca al hormigón para de manera común resistir las tensiones a que está sometido.

El análisis en tal caso se efectúa tratando al compuesto como un modelo monodimensional en el cual el sistema de fibras cortas discretas orientado de manera casual viene a ser como un sistema equivalente isótropo en el cual la fibra no está orientada en la dirección de los esfuerzos y posee un volumen efectivo ηoVf, siendo ηo el factor de eficiencia de alineación de las fibras.

Valores típicos de ηo han sido determinados por diferentes investigadores según la orientación de la fibra, así tenemos:

Orientación de la Fibra	**Criterios de Cox**	**Krenchel**
Lineal	1	1

Plano	1/3	3/8
Espacial	1/6	1/5

lo cual expresa que consideran que las fibras orientadas en la dirección de las fuerzas de tracción dependen de criterios probabilísticos, en el caso de lineal el 100 %, en el plano del 33 al 38 % y casual del 16 al 20 %.

II.2 - Comportamiento a Flexión.

La influencia de la fibra, en que el hormigón fibrorreforzado resista bien las flexiones es alta.

Es necesario comprender que en un elemento flexado se encuentran muy bien definidas las zonas que están traccionadas y las que están comprimidas, por tanto son válidos los gráficos de σ – e para los comportamientos del material fibroso a la compresión y a la tracción. Siendo necesario abordar el estudio del comportamiento de un elemento monodimensional fibrorreforzado y determinar la relación existente entre momento y curvatura, dividiendo las dos fases en que se presenta, o sea, la fase elástica y la fase postelástica.

II.3 - Comportamiento a Cortante.

El análisis del comportamiento a cortante del hormigón fibrorreforzado es objeto de amplios estudios, la causa es la dificultad que conlleva la individualización total de lo que aporta la influencia de la fibra a la acción cortante. Los parámetros fundamentales que influyen en el cortante son tipo de fibra discontinua, fracción de volumen, relación área-diámetro y eficiencia.

El comportamiento a cortante de los hormigones fibrorreforzados adquiere verdadera importancia cuando no existe armadura transversal de acero y al producirse la fisuración. Su análisis se basa en el equilibrio de fuerzas en un elemento fisurado en ausencia de armadura transversal de acero.

Otras propiedades mecánicas también pueden ser evaluadas a los hormigones fibrorreforzados, como son:

II.4 - Comportamiento a Torsión.

La capacidad de resistir los esfuerzos a torsión a que se ve sometido un elemento de hormigón fibrorreforzado va a estar condicionado al contenido de fibra que posea y a la relación longitud-diámetro de la misma.

II.5 - Tenacidad.

La tenacidad es una importante característica de los hormigones fibrorreforzados y se define como la energía total absorbida antes del colapso del elemento. En la práctica se representa como el área bajo la curva del diagrama carga-deformación a flexión.

En un material ordinario la tenacidad está muy ligada a la propagación de la fisura. En presencia de fibras, éstas interceptan a las fisuras en su proceso de formación, no dejan que se propaguen y hay una considerable posibilidad de aumento de la energía antes del colapso, por tanto una posibilidad real de aumentar la tenacidad.

El aumento de la tenacidad esta influenciado por parámetros tales como orientación, contenido y relación de forma de las fibras.

- Resistencia al impacto.

Función de la energía absorbida con un carácter dinámico y está ligada a la capacidad de asimilar energía estática en correspondencia con un determinado límite de deformación. La capacidad de absorber energía es proporcional al contenido de fibras e inversamente proporcional a la distancia efectiva de las mismas.

- Resistencia a la fatiga.

Se ha comprobado que un material fibrorreforzado aumenta la resistencia a la fatiga al crecer el volumen de fibras.

Podemos considerar entonces que el conocimiento de las propiedades mecánicas de los hormigones fibrorreforzados es importante, máxime cuando trae aparejado mejoras a las características tensiónales de los compuestos logrados así como que la evaluación de las propiedades mecánicas de los hormigones fibrorreforzados es necesaria, pero aún incipiente dada la amplia gama de fibras posibles a utilizar. De otra parte se requiere de equipamiento,

laboratorios y personal altamente calificados para acometer con seriedad científica la evaluación de los diferentes hormigones fibrorreforzados.

CAPÍTULO III: PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS FIBRAS DE ACERO, VIDRIO Y SINTÉTICAS.

III.1 - Fibras de Acero.

Las fibras de acero puede ser redondas, planas o de forma especial. Las redondas se obtienen de picar los filamentos de acero en el proceso productivo y las planas y de forma especial a partir de métodos no convencionales que han sido patentados como los desarrollados por la Battelle Development Corporation, de Estados Unidos.

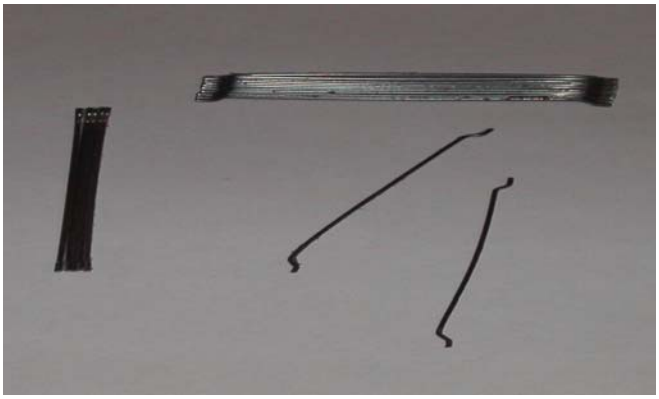
III.1.1 – Características de las Fibras de Acero.

Presentan los siguientes límites usuales de dimensiones:

- Fibras redondas entre 0.20 y 0.80 mm de diámetro con largos variables en un rango entre 5 y 50 mm.
- Fibras planas entre 0.15 y 0.40 mm de grueso y longitudes que van de 0.25 a 0.90 mm.

Un criterio de elección del largo de las fibras es el que la relación geométrica largo/diámetro esté comprendida entre 30 y 200.

El reforzar hormigones con fibras lisas y rectas de acero trae aparejado que



sólo hay disponible una pequeña longitud de empotramiento y el esfuerzo máximo está dado por la capacidad de adherencia entre las fibras y la matriz a lo largo de la superficie de contacto por lo que se realizan muchos esfuerzos investigativos a aumentar la capacidad de las fibras

para obtener esfuerzos mayores fundamentalmente aumentando la adherencia por tratamiento superficial o por variación de forma.

La posible corrosión de las fibras de acero que aparece en la superficie del hormigón puede constituir un problema, aún cuando se ha demostrado que es un fenómeno superficial en la fibra. Las fibras tratadas y la correcta colocación del hormigón fibroso en la obra pueden minimizar o excluir el peligro de formación de óxido.

Dar propiedades mecánicas exactas de los hormigones reforzados con fibras de acero o de las propias fibras de acero se convierte en difícil sino hablamos de marca y fabricante, longitud y diámetro, volumen de fibras y modo de fabricación; pero sin embargo si es factible considerar los cambios fundamentales que poseen los hormigones fibrorreforzados con acero. Estos son:

- Aumento de la resistencia a la tracción directa.

  Variable con el volumen de fibras. Con el 2 % de fibras de acero medidas en volumen el incremento de la resistencia a tracción es del 25 % aproximadamente.

- Aumento del límite elástico o resistencia a la formación de fisuras.

  Con el 2 % de fibras de acero la resistencia a la formación de fisuras aumenta en un 15 %.

- Aumento en la resistencia última.

  Para igual proporción de fibras es más del 100 %.

- Aumento de la resistencia dinámica.

  Es entre 5 y 10 veces la resistencia del hormigón simple.

- Aumento de la resistencia a la fatiga.
- Aumento sustancial en la ductilidad y en la absorción de energía antes de la rotura total (colapso).
- Aumento de la resistencia a la fricción y deslizamiento en losas de pavimento.

En general las propiedades del hormigón reforzado con fibras de acero mejoran comparadas con el hormigón simple y son:

Tabla No. II

Comparación de Propiedades de Hormigón Simple y Hormigón Reforzado con Fibras de Acero

PROPIEDAD	HORMIGON SIMPLE	FRC	%
Esfuerzo tracción (kg/cm2)	21	25	119
Esfuerzo compresión (kg/cm2)	440	490	111
Esfuerzo flexión (kg/cm2)	50	80	160
Esfuerzo cortante (kg/cm2)	30	50	167
Módulo de Elasticidad (x 10 6)	0.16	0.17	106
Relación entre las resistencias al impacto	1	3	300
Deformación a la rotura	0.01 – 0.02	0.04 – 0.05	250

III.1.2 - Campo de Aplicaciones de las Fibras de Acero.

La aplicación de las fibras de acero a los hormigones depende de la capacidad de los proyectistas para darle un empleo adecuado en función de la problemática planteada.

La primera fundición de hormigón con fibras de acero a escala no experimental tuvo lugar en Marzo de 1974 en Fort Hood, Texas, Estados Unidos. Se colocaron 2 426 metros cúbicos de hormigón para pavimento de un parque de equipos tácticos para el mantenimiento de tanques de combate y vehículos de oruga. El espesor del pavimento fue de 100 a 130 mm, 1.5 % del volumen de hormigón con fibras de acero, y se seleccionó una fibra redonda de diámetro 0.3 mm y 12.7 mm de longitud. Este pavimento de hormigón fibroso se colocó sobre el original que era de hormigón asfáltico. La experiencia, en general, fue todo un éxito y abrió el camino.

Las aplicaciones dadas son en:

- Pavimentos. Fundamentalmente en losas de aeropuertos.
- Pisos industriales.
- Tableros de puentes.

- Losas sin vigas.
- Estructuras a prueba de explosión.
- En hormigones refractarios. Hasta temperaturas de 1600^{o} C.
- Estructuras laminares.
- En muelles.
- Cascos de embarcaciones.

Las fibras de acero son posibles de aplicar para usos a largo plazo, ya que, en general, son estables dentro de la matriz cementicia.

Al considerar fibras de acero para las diferentes aplicaciones prácticas existen cuatro factores que deben ser considerados en el diseño:

1. Longitud de las fibras. Las de mejores condiciones para proveer la adecuada ductibilidad y energía de absorción son las de 25 a 50 mm.
2. Volumen adecuado de fibras de acero y del resto de los materiales que componen el hormigón fibrorreforzado.
3. Fabricación adecuada del hormigón fibrorreforzado.
4. Protección a la corrosión. Aún cuando se plantea que la corrosión de las fibras de acero no es un problema real, en determinados ambientes, es necesario considerarla. Se producen fibras especiales con este propósito aún cuando se elevan los costos, estás son de carbón, acero inoxidable y de aleaciones de níquel-cromo.

III.2 - Fibras de Vidrio.

III.2.1 - Características de las Fibras de Vidrio.

Se obtienen mediante el derretido por diversos procesos en dependencia del tipo de fibra que deseamos obtener. Estos procesos son centrifugados, soplados o halados.

En el proceso de soplado se obtienen fibras de aproximadamente 150 mm, en el proceso de centrifugado se obtienen fibras más largas y discontinuas y por halado vamos a obtener las fibras continuas; usualmente se usa un embase de

platina con orificios de fondo, en forma de tablero de ajedrez y en número de 16 000 orificios.

Las fibras de vidrio se emplean en longitudes que van de 12 a 50 mm y han tenido un auge relativo en los procesos constructivos. La principal dificultad que se ha presentado con las fibras de vidrio es que su comportamiento depende del tipo de matriz en que se encuentren. En el caso de materiales neutros o poco alcalinos, como el yeso o los cementos aluminosos, el vidrio E, de tipo borosilicato con bajo contenido de alcali, utilizado para reforzar plásticos da muy buenos resultados, no así con los cementos comunes de alcalinidad elevada donde las fibras tienden a desintegrarse expandiéndose el hormigón. Entonces se plantean dos alternativas:

1. Proteger las fibras del ataque alcalino mediante la aplicación de tratamientos superficiales.
2. Fabricar fibras con vidrios de composición especial, resistentes a los álcalis. A estos vidrios se les llama AR, alcali resistant.

Las primeras fibras de vidrio AR fueron desarrolladas en Gran Bretaña en la pasada década de los 60 y comienza su producción industrial en 1971 por la firma Pilkington, bajo la denominación de CEM-FIL. Estas fibras no fueron todo lo buenas que se esperaba, perdiendo lentamente su resistencia a tracción y pasados de 8 a 10 años, según las condiciones de preparación y uso, se producía la desintegración de los elementos con ella fabricados.

En un esfuerzo por evitar esta grave problemática, en 1985, Pilkington pone en el mercado las fibras de vidrio CEM-FIL 2 que poseen un recubrimiento protector a base de polihidroxifenoles el cual retarda la acción fibra-matriz.

Las principales fibras de vidrio registradas se producen sólo en tres países: Gran Bretaña (GB), Japón (J) y la República Checa (RC). La composición de las mismas es:

Tabla No. III

Composición de las Principales Fibras de Vidrio

Componente	CEN-FIL (GB)	AR - MINELON L (J)	AR-2500 (J)	SUPER AR (J)	REZAL (RC)	VVUS-AF (RC)
S1O2	62.2	62.6	59.6	56.5	60.0	61.5
Al203	0.8	1.6	0.4	-	5.0	0.89
ZrO2	16.7	14.1	18.5	17.0	5.0	12.8
CaO	5.6	6.9	0.5	-	10.0	4.1
Na2O	14.8	12.1	17.2	16.2	10.0	12.9
K2O	-	-	2.3	-	-	-
Tierras Raras	-	10.3	-	-	-	-
BaO	-	-	-	-	10.0	5.6
MgO	-	-	-	-	-	1.84

U. M. : %

El mecanismo de ataque del medio con PH > 9 consiste en la destrucción progresiva de la red química, es decir, la ruptura de los puentes de oxígeno, mediante reacción química.

Estas reacciones, que son función del tiempo, y que pueden llegar a la destrucción de las fibras o a la llamada cementación de las mismas con la matriz, debido a la acumulación de los productos de reacción, están condicionados por:

- Composición química de la fibra.
- Forma de preparación del compuesto.
- Presencia de otros agregados.
- Tipo de clima (cálido y húmedo, frío y seco).

Partiendo del vidrio básico (silicarciconato), se han investigado una gran cantidad de composiciones, pero sólo se han comercializado las seis anteriores y se trabaja en el desarrollo de tratamientos y recubrimientos especiales que protejan a las fibras del ataque alcalino. La mayoría de estos recubrimientos son de origen orgánico, muy caros y podemos afirmar que el de mejores resultados es el que contiene polihidroxifenol, el CEM-FIL 2.

III.2.2 - Propiedades Mecánicas de los Hormigones Reforzados con Fibras de Vidrio.

Los hormigones reforzados con fibras de vidrio se les conoce mundialmente a partir de las siglas GRC, Glass Reinforced Concrete, siendo los factores que más inciden en sus propiedades mecánicas la naturaleza de las fibras, la orientación en el material compuesto, el tamaño y cantidad de las fibras y las condicionales de fabricación, curado, uso y medioambiente.

Las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos a partir de GRC están dadas, en las primeras edades, por las anteriormente tratadas para los hormigones fibrorreforzados. En función del tiempo el tema de los métodos de ensayo y en particular, de aquellos que pretenden en forma acelerada predecir el comportamiento del material a largo plazo, están en permanente discusión. Algunas normas plantean medir la perdida de peso por unidad de superficie (en $mg.dm^{-2}$) de un trozo de vidrio de forma geométrica determinada, sometido durante tres horas a la acción de una disolución acuosa en ebullición de Na2CO3 y NaOH. Entonces se establece una clasificación de los vidrios en tres clases según las pérdidas. Los de pérdidas menores a 75 $mg.dm^{-2}$ son los más resistentes a los álcalis. En cuanto a las fibras propiamente se plantea, en función del tiempo, medirles el diámetro o la pérdida de peso luego del ataque alcalino.

Estos métodos, complejos en sí, difieren de las condiciones reales que poseen las fibras de vidrio dentro del medio cementicio y se ha desarrollado el método llamado SIC: Stand in Cement, aunque es muy difícil de normalizar.

Los valores de resistencia media esperada a los 20 años, de las fibras de vidrio fabricadas por proyección/succión con un 5 % en peso de CEM-FIL son:

Tabla No. IV

Propiedades Resistentes de las Fibras de Vidrio

PROPIEDAD	EXPUESTO AL:		
	AIRE	AGUA	INTEMPERIE
▪ Flexión			
o Rotura (MN/m2)	26 – 34	15 – 20	13 -17
o Límite de Proporcionalidad	14 – 16	15 – 18	13 – 16
▪ Tracción (MN/m2)			
o Rotura (MN/m2)	11 – 15	6 – 8	5 – 7
o Límite de Proporcionalidad	7 – 8	6 – 8	5 – 7
▪ Módulo de Young (GN/m2)	22 – 23	28 – 34	25 – 32
▪ Resistencia al Impacto (Nmm/mm2)	14 – 20	2 – 3	2 - 4

Los estudios realizados por Pilkengton Brothers sobre la CEM – FIL, actualmente permiten predecir las anteriores características hasta edades de 50 años.

Respecto a las demás características físicas que definen los elementos de hormigón armado con fibras de vidrio podemos plantear:

- Densidad: Oscila, según el grado de compacidad alcanzado, entre 1.7 y 2.2 t/m3. Es frecuente considerar 2 t/m3.
- Retracción: Alcanza valores entre 1.5 y 0.6 mm/m. Se plantea en piezas de fachadas y para climas normales que la máxima retracción es inferior a 1 mm/m.
- Fluencia: Se presenta al igual que hormigones y morteros pero con menores valores de tensiones.
- Permeabilidad al Aire: Depende de las condiciones de curado. Oscila entre 3 perms en ambiente seco a 0.15 perms cuando se ha curado en ambiente húmedo.
- Permeabilidad al Agua: Se considera un material impermeable.
- Dilatación Térmica: El coeficiente oscila entre 7 y 12 x 10^{-6} ^{o}C.

- Conductividad Térmica: Varía con el contenido de agua (humedad) y es similar al del hormigón, oscila entre 0.4 – 0.8 kcal/m^2 ^oC.
- Aislamiento Acústico: Debido a su compacidad, origina reducciones de unos 30 decibelios para frecuencias comprendidas entre 350 y 4000 Hz.

III.2.3 - Utilización de las Fibras de Vidrio.

Su empleo está dado en sistemas de papelería, fachadas y decorados fundamentalmente. Ejemplo constructivo lo es la fabricación de los elementos de fachada del Estadio Santiago Bernabéu de Madrid, España. Los procesos de fabricación se han desarrollado a partir de las tecnologías de los plásticos reforzados con fibras de vidrio y del hormigón prefabricado.

Se utilizan dos métodos constructivos:

✶ Proyección Simultánea.

Se proyecta independientemente un chorro de mortero pulverizado con aire a presión y otro de fibras de vidrio cortada a una longitud prefijada. Se puede compactar con rodillos o por proceso de vacío cuando se fabrican placas planas. Este proceso se emplea en el 90 % de sus usos dada la versatilidad y permite aplicar capas muy finas de 2 o 3 mm.

✶ Hormigonado normal.

Se procesan morteros a los que se les adicionan las fibras previamente y se mezclan batiéndose. Se compacta por vibración.

El usar GRC implica las siguientes ventajas:

- Buena relación resistencia/peso.

Permite utilizar espesores con reducciones de peso hasta un 85 % frente a paneles de hormigón.

- Facilidad para fabricar por proyección formas complicadas.
- Buena resistencia al impacto.

Fundamentalmente a edades tempranas, lo que facilita el manejo de los productos.

- Combinarse fácilmente con otros materiales.
- Permite la conformación de paneles sándwich.

- Cortarse o taladrarse fácilmente con herramientas simples.
- Permite conseguir variedad de acabados.
- Permite adicionar otros materiales en el mortero.

Como ejemplo podemos citar morteros con cenizas y fibras de vidrio de gran resistencia al fuego.

III.3 - Fibras Sintéticas.

III.3.1 - Desarrollo de las Fibras Sintéticas.

El uso de las fibras de asbesto ha sido amplio, de gran universalidad constructiva. El que sea un recurso mineral y se haya comprobado clínicamente que es una sustancia cancerígena ha hecho buscar nuevas fibras que se revelen como suficientes y mejor aún que las de asbesto. En países con alto grado de desarrollo en su industria petroquímica han investigado y desarrollado fibras sintéticas.

Las fibras sintéticas se emplean, fundamentalmente, desde la década de los 80 del pasado siglo, pero ya en los 70 se estudiaba su empleo. Por su forma poseen diferente configuración, pudiendo ser filamentos aplanados o redondeados y en forma de malla.

Cada productor, al comercializar estas fibras, expone sus características tensomecánicas, sus propiedades básicas así como el campo de aplicación que propone. De manera general nos presentan a la fibra pero no se responsabilizan con el producto final obtenido, práctica mundial, muy acertada, y referida sólo a la comercialización.

Se termino el siglo XX con la norma ASTM – 1116 planteando que las únicas fibras sintéticas totalmente probadas para ser utilizadas en hormigones son las de polipropileno. Las fibras de rayón, acrílico y poliéster se degradan en el medio alcalino de la matriz cementicia, por lo que no se recomiendan.

Dentro de las marcas más reconocidas de fibras sintéticas están Fibermesh, Harbourite, Reforcreto, Fibermat y Fibercon entre otras.

III.3.2 - Fibermesh.

Los primeros estudios con fibras de polipropileno se iniciaron a principios de la década del 60 por la División de Desarrollo de la Armada de los Estados Unidos, los que consideraron el material sintético el más apropiado para producir fibras para los hormigones.

En 1982, Industrias Sintéticas Ind., la segunda compañía productora y comercializadora de polipropileno, adquirió la patente de las fibras para hormigones, la desarrolló y lanzaron al mercado Fibermesh. Actualmente se usa en más de 30 países de América, Europa y Asia.

Las fundamentales propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con Fibermesh están dadas por programas de ensayos basados en parámetros comparativos que producen una información útil para su aplicación.

Son fibras químicamente inertes, no producen corrosión interna y tienen una gran resistencia a los ácidos minerales, básicos y sales orgánicas, son estables y no absorben agua. De manera general las propiedades fundamentales las podemos resumir en:

- Absorción……..Ninguna
- Gravedad Específica……..0.9
- Longitud……12, 19 y 51 mm
- Punto de Ignición……...590 oC
- Conductividad Térmica……..Ninguna
- Conductividad Eléctrica…….Ninguna
- Resistencia a la sal y al ácido…….Alta
- Resistencia a la Tensión……..3.5 KN/mm2

Fibermesh se recomienda para:

- Controlar el agrietamiento resultante de tensiones internos provocadas por contracción y asentamiento plástico.
- Como sustituto de la malla electrosoldada y del acero por temperatura en hormigones.
- Disminuir la permeabilidad.
- Obtener mayor resistencia al desplazamiento de las piezas.
- Aumentar la resistencia al impacto.
- Para dar soporte y cohesión al hormigón en planos inclinados.
- Obtener mayor resistencia a la fatiga.
- Aumentar la durabilidad de las estructuras y reducir los problemas de corrosión del acero en medios agresivos.
- En lugares donde no debe haber materiales metálicos.
- Áreas en donde se requiere de materiales antialcalinos y resistentes a los productos químicos.

El mezclado de Fibermesh en el hormigón puede ser en planta o en la propia obra, fundamentalmente después de agregar los áridos, el cemento y el agua. La dosificación más usada es la de 900 gr/m^3 de hormigón.

La terminación es la misma que para un hormigón normal y en general la presencia de fibras en la superficie del hormigón es aceptada pero de no quererse, mediante métodos mecánicos, puede eliminarse o también pueden usarse procesos de flameado.

Dentro de las obras fundamentales que se han realizado con Fibermesh están la construcción de pisos en naves industriales, lagos artificiales en zonas recreativas como el realizado en Monterrey donde se ejecutaron 3 500 m^2 en piso y paredes combinado con malla metálica, viviendas, sustitución de aceros en pavimentos de vías, centros comerciales, en postes eléctricos para reducir los problemas de corrosión del acero y aumentar la durabilidad, tubos, pisos de diferentes edificaciones y usos marinos.

En general las ventajas que presentan los hormigones fibrorreforzados con Fibermesh son:

1. Inhibe el agrietamiento.
2. Incrementa la resistencia al impacto e impide el despedazamiento.
3. Incrementa la durabilidad y la vida útil de las estructuras.
4. Reduce la permeabilidad y los problemas de corrosión.
5. Aumenta la resistencia a la compresión y a la flexión.
6. Sustituye a la malla electrosoldada.
7. Incrementa la resistencia a la abrasión y al desgaste.
8. Reduce el tiempo de ejecución.
9. Es seguro y fácil de usar.

III.3.3 - Empleo de Otras Fibras Sintéticas.

En sentido general las fibras sintéticas poseen propiedades, características y usos similares a las denominadas Fibermesh. Algunas de las más usadas son:

- Harbourite. Fabricada con polipropileno, sus características son:
    - Longitud ……..13 y 19 mm
    - Gravedad Específica…….0.91
    - Elongación……aprox. 40 %
    - Temperatura de Ignición……...593 ^{o}C
    - Absorción……..Ninguna
    - Resistencia a la Tensión……0.56 – 0.77 KN/mm^2
    - Módulo de Young……3.5 KN/mm^2

Se dosifica a razón de 900 g/m^3 de hormigón y sus usos son en estucados, mortero, hormigón lanzado o bombeado, tejas, bloques de hormigón prefabricados. Estando las ventajas asociadas a su fácil utilización al agregarse de manera simple a la mezcla, produce hormigones resistentes al despedazamiento, dúctil y no quebradizo, reduce los deshechos y las grietas producidas en el manejo y traslados de unidades prefabricados, Inhibe las grietas producidas por el cambio de volumen debido a la contracción por el secado, no le afectan productos químicos ni la corrosión y mayor resistencia de las mezclas obtenidas.

- Reforcreto.

Es una fibra de poliolifina extruida, fibrilada, usada como refuerzo secundario en el hormigón cuyas características son:

- Gravedad Específica…….0.91
- Densidad……..56 lb/ft3
- Módulo de Elasticidad…….0.70 x 10 6 psi
- Esfuerzo a la Tensión……...70 000 psi
- Longitud…….....19, 38, 57 y 64 mm
- Volumen de fibras…….0.1 %
- Elongación…….8 %
- Índice de difusión de fuego……1.6

Se dosifica a razón de 1 kg/m3 de hormigón. Sus usos más frecuentes son en paneles para fachadas, tanques sépticos, losas, bóvedas, tuberías prefabricadas, estanques, canales y zanjas y recubrimiento de túneles. Sus ventajas son coincidentes con las de Fibermesh.

- Fibermat 460.

Constituye realmente una malla de fibras de polipropileno la cual desarrolla un mejor balance entre fuerza y elongación como propiedad básica, por tanto soporta una fuerza superior contra los impactos y la durabilidad.

Las características fundamentales son:

- Resistencia a la Tensión…….66 x 46 lbs
- Elongación……..25 x 33 %
- Tensión a la Rotura…….130 psi
- Peso…….32 oz/yd2
- Ancho……..39 oz/yd2
- Abertura……...3/16” x 3/16”

La colocación de esta malla es simple y mucho más humana que las de acero usadas como refuerzo en las construcciones de ferrocemento, pero el sólo hecho de tener que colocarla constituye una desventaja ante las fibras cortas.

CAPITULO IV: USO DE FIBRAS ORGÁNICAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

Los trabajos de investigación en el campo de las fibras naturales como refuerzo de hormigones y morteros han estado muy determinados por las fibras propias que posee cada país, totalmente con carácter local, y se ha trabajado en la búsqueda de soluciones de cubiertas y en estudiar la durabilidad fundamentalmente.

La literatura reporta más de 40 países, que de una forma u otra, usan fibras orgánicas en el proceso constructivo. A manera de resumen nos referiremos a algunos de estas:

Tabla No. V

Fibras Mas Utilizadas por Países

PAIS	FIBRAS MAS UTILIZADAS
Australia	Coco, Bambú, Celulosa, Algodón
Bangladesh	Bambú
Botswana	Sisal
Brasil	Bambú
Dinamarca	Celulosa
Rep. Dominicana	Sisal
México	Henequén, Maguey, Lechugilla
El Salvador	Celulosa
Cuba	Henequén

Los países desarrollados, en especial Gran Bretaña y Suecia, han llevado a cabo las investigaciones fundamentales del uso de fibras orgánicas en países tercermundistas, que son las que las poseen mayoritariamente. Destacan los institutos de investigación IT Building Materials Workshop de Gran Bretaña y el Swedish Cement and Concrete Research Institute de Suecia.

Las investigaciones han estado encaminadas a determinar, entre otros, los aspectos siguientes:

a) Clasificación de las fibras orgánicas, con especial interés hacia sus características químicas y físicas.
b) Características morfológicas de las fibras y su interacción con la matriz.
c) Durabilidad.
d) Desarrollo de productos tipos y métodos o tecnologías de producción.

IV.1 - Fibras Orgánicas Más Utilizadas.

Dentro del amplio espectro de fibras orgánicas que se utilizan o son factibles de utilizar para reforzar hormigones tenemos:

- Fibras de Coco.

El coco posee fibras duras unidas entre si por un material blando. Estas pueden ser extraídas por inmersión en agua de manera tal que se descomponga el material suave y se recuperen las fibras duras, es el método tradicional de los países pobres aún cuando existe la posibilidad alternativa de utilizar métodos mecánicos de extracción que son más caros y requieren de un basamento tecnológico. El cultivo de coco es restrictivo de regiones tropicales de África, Asia y América Central.

- Fibras de Sisal.

Las fibras de sisal son una de las más fuertes que podemos encontrar dentro de las fibras naturales, está ampliamente difundido su cultivo y uso para reforzar el hormigón. Muchas investigaciones en este campo han sido llevadas a cabo con ellas y los resultados han sido satisfactorios.

- Fibras de Bagazo de Caña de Azúcar.

El cultivo de la caña de azúcar es propio de las regiones tropicales y subtropicales cuya función principal es obtener el azúcar. El proceso de obtención del azúcar está dada a partir de la maceración de la caña para extraerle el jugo y queda el bagazo. Dicho bagazo tiene amplios usos

conocidos tales como en tableros y en la industria papelera, pero también se usan en hormigones. En Viet Nam se hacen tejas de cubiertas con esta fibra de manera usual. El bagazo contiene alrededor del 50 % de fibra, un 30 % de jugo y el otro 20 % restante lo componen otros sólidos solubles. Para obtener una buena fibra a incorporar al hormigón es necesario eliminar el jugo y remover dichos sólidos, lo cual se hace a través del lavado con agua.

- Fibras de Bambú.

La planta de bambú puede llegar a tener alturas de hasta 15 metros y un grosor variable entre 25 y 100 mm, siendo un cultivo de regiones tropicales y subtropicales. Debe ser utilizado seco y sirve para reforzar el hormigón en sustitución de las barras de acero, o sea, se emplea como material continuo de refuerzo. Tiene una alta capacidad de absorción del agua y un bajo módulo de elasticidad. De querer ser utilizadas las fibras propiamente, debe ser empleado algún procedimiento mecánico especial.

- Fibras de Yute.

El yute es cultivado principalmente en la India, Bangladesh, China y Tailandia; en Cuba se cultiva también. Posee muchos usos entre los que se encuentran los tradicionales de hacer ropas o embases para transportar granos, los llamados sacos. Por su resistencia a la tensión las fibras de yute pueden ser usadas en matrices cementicias. El proceso para obtener las fibras de yute es muy simple: las plantas maduras son cortadas y remojadas en agua, aproximadamente a las cuatro semanas ya la corteza está descompuesta, entonces las fibras expuestas son despojadas del tallo, lavadas y secadas.

- Fibras de Madera.

La madera posee resistencias a la tensión variables sobre la base de su tipo. Una pieza de madera normal posee resistencias sobre los 70 MPa, pero en su formación tiene defectos y las fibras que la conforman, de forma simple, pueden alcanzar resistencias unas diez veces superiores. Las longitudes de las fibras de madera desde 2.5 mm a 7 mm normalmente. La producción de pulpa de madera, que es la forma más empleada de producciones secundarias, es a partir de procesos clasificados como totalmente químicos,

semiquímicos o mecánicos; esta clasificación es referida a la naturaleza del proceso de desfibrado. La pulpa obtenida por procesos químicos y denominada KRAFT es una de las más comúnmente usadas para reforzar el cemento.

- Otras Fibras Naturales.

Infinidad de investigaciones se llevan a cabo para explorar la posibilidad de uso de otras fibras naturales como son las de palma, hierba elefante, flash, musamba, macio, etc, para ser empleada como refuerzo en hormigones y morteros.

Dentro de las aplicaciones prácticas más difundidas de las fibras tenemos:

- Sisal: tejas de techos, planchas corrugadas, silos, tanques de agua y gas, paneles, paredes, etc.
- Hierba Elefante: Tejas y paredes de viviendas.
- Madera: Pisos, planchas corrugadas, elementos varios de plásticos.
- Henequén: Pisos, elementos de cubierta, formando parte de sistemas de impermeabilización, canteros, organopónicos.

Las propiedades típicas y mecánicas de diferentes tipos de fibras naturales se muestran en la Tabla No. VI denominada Propiedades Típicas de las Fibras Naturales y la Tabla No. VII Propiedades Mecánicas de Diferentes Tipos de Fibras, ambas editadas por el American Concrete Institute.

IV.2 - Proporciones de Mezclado, Hechura y Colocación.

Las proporciones de mezclado de las fibras reforzando hormigones no pueden ser generalizadas debido a la amplia variedad de las mismas dado que son un producto de la naturaleza y a su vez pueden ser usadas con diferentes tipos de cementos, puzolanas, agregados finos y gruesos, agua y aditivos.

Los materiales constituyentes de los hormigones fibrorreforzados deben cumplir las siguientes características:

- Cemento.

La ASTM plantea 5 tipos de cementos como genéricos:

  - Tipo I: Uso general.
  - Tipo II: Moderado calor de hidratación.

- Tipo III: Endurecimiento rápido.
- Tipo IV: Bajo calor de hidratación.
- Tipo V: Resistente a los sulfatos.

El recomendado para ser usado es el Tipo I, aunque otros, dependiendo del uso

específico a dar pueden ser empleados.

El empleo de cementos con altos contenidos de puzolana tienden a disminuir el potencial de hidrógeno en el hormigón, lo cuál es satisfactorio para disminuir el efecto degradante que se produce en las fibras naturales en función del tiempo debido a la presencia de sustancias como la celulosa, la lignina y la hemocelulosa. En general los cementos deben cumplir las especificaciones estándares C – 150 o C – 595 de la ASTM o las propias de cada país de existir las mismas.

- Áridos.

Deben cumplir los requerimientos especificados en la ASTM – C – 33: Estándar Specification for Concrete Aggregates o las propias normas del país. En el caso de fibras de maderas lo usual es usar áridos finos con partículas sobre 1 mm.

- Aditivos.

La acción de la glucosa posibilita efectos retardadores en el fraguado del hormigón, por tanto, el uso de fibras que posean un alto contenido de la misma debe llevar implícito el análisis de usar aditivos acelerantes de fraguado. Sino van a ser utilizadas barras de acero en el elemento a construir el cloruro de calcio puede ser empleado como acelerante. Compuestos reductores de agua y súper plastificantes pueden ser adicionados para incrementar la laborabilidad y la plasticidad. Dependiendo del tipo de fibra se recomienda el uso de agentes microbicidas para prevenir el ataque bacteriano sobre las fibras orgánicas.

- Fibras.

Las longitudes de fibras más comúnmente utilizadas varían de 25 mm a 500 mm, excepto en el caso de las de madera en que van de 1 a 7 mm. Por ser estas fibras productos naturales no son uniformes ni en diámetro ni en

longitud. Los diámetros van de 0.10 mm a 0.75 mm por lo general y exceptuando las fibras de madera en que son de 0.01 mm a 0.08 mm.

IV.3 - Métodos de Mezclado y Colocación.

Existen tres métodos de mezclado de las NFRC, estos son:

1. Mezclado húmedo.
2. Mezcla compacta seca.
3. Mezcla mortero húmedo-desecado.

El primero es el más usado en la generalidad de las construcciones, conlleva a usar volúmenes de fibras bajos y a tener en consideración el contenido de agua que posee intrínsicamente la fibra orgánica a usar. En este método la fibra puede ser incorporada a los hormigones que se realicen tanto si se mezclan a mano, en hormigoneras estacionarias o en plantas de premezclado.

El procedimiento más seguido es mezclar el cemento con agua hasta formar la pasta de cemento, luego añadir los agregados finos, las fibras, el resto del agua, los agregados gruesos y los aditivos de últimos de llevarlos el diseño de mezcla. Normalmente suele darse un tiempo adicional de mezclado para lograr la correcta uniformidad del material con la debida distribución casual.

El procedimiento de mezclado debe ser complementado a partir de la ASTM C – 94 y las recomendaciones de la ACI – 304. El muestreo del material resultante debe estar acorde a las especificaciones C – 172 y C – 685 de la ASTM o las regulaciones propias del país.

El segundo método, mezcla compacta seca, es usado generalmente en elementos que se produzcan industrial o semi-industrialmente. En este método el volumen de fibras usado es sobre 10 veces superior al primer método. Las fibras están en una superficie saturada y seca de cemento y áridos la cual es mezclada y se le adicionan pequeñas cantidades de agua. El procedimiento de mezclado normal es a mano pero otro tipo de mezclado acorde a la ASTM C – 94 puede ser usado.

El tercer método mezcla de morteros húmedo-desecado es el que se usa comúnmente para las fibras de madera reforzando hormigones. En este método el cemento fibroso producido es formado a partir de un mortero

húmedo que tenga sobre un 20 % de sólidos (fibras-cemento o fibras-mortero). Los excesos de agua son eliminados a través de la aplicación de succión y presión.

Los volúmenes de fibras naturales usados en las mezclas fluctúan desde un 3 % (aproximadamente 0.3 kgF/m^3) hasta un 30 % (22 kgF/m^3) dependiendo del tipo de fibra usado y el proceso de manufactura del hormigón fibrorreforzado que se emplee.

IV.4 - Propiedades de las Fibras Naturales Reforzando el Hormigón.

Los factores más importantes en los hormigones reforzados con fibras naturales son el tipo de fibra, la longitud de la misma y el volumen de esta a adicionar.

Los resultados experimentales obtenidos plantean que los mejores valores de hormigón fibrorreforzado con fibras naturales se obtienen con longitudes sobre los 25 mm y contenidos de de fibras del 3 %.

El adicionar las fibras orgánicas a los hormigones mejora las propiedades intrínsecas de los mismos, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

- Estado fresco de las NFRC.

La adición de fibras conlleva, en muchos tipos de estas, a una reducción de la laborabilidad los cual es debida a dos causas. La primera, el incremento del área superficial de los materiales constituyentes del hormigón y la segunda asociada a la absorción de agua por las fibras.

Otro aspecto a cuidar en el hormigón fresco es que al mezclarse las fibras naturales no haya un doblamiento de las mismas, llamado “efecto balling”. Este está determinado fundamentalmente por la longitud de la fibra y por el volumen de esta en la mezcla. Puede conllevar a un decrecimiento en la resistencia del material compuesto. Para evitarlo, independientemente de escoger las longitudes y volúmenes óptimos, es necesario que las fibras se mezclen progresivamente, lo más lento posible, dispersas y con la presencia de áridos en la mezcla; nunca junto al agua y el cemento solamente.

La relación agua – cemento es un factor indispensable a cuidar.

El empleo de moldes confinados y el empleo de la vibración mejoraran satisfactoriamente los resultados que se obtengan del producto final.

- Estado endurecido de las NFRC.

Una de las importantes propiedades de los hormigones de los hormigones endurecidos es su resistencia, son muy resistentes a compresión y el adicionarle las fibras provoca mejora en diferentes propiedades e incremento de la resistencia. En función del tipo, longitud y volumen de la fibra deben ser evaluadas las propiedades mecánicas de los hormigones fibrorreforzados.

El objetivo que se busca con los NFRC no es el aumento de la resistencia a compresión sino los aumentos de la resistencia del compuesto a tracción y a la flexión fundamentalmente, la capacidad de absorción de energía y la eliminación de la fisuración.

En general los investigadores, al escoger la fibra a analizar, dan los resultados muy propios de las características resistentes de los compuestos obtenidos.

Otro aspecto muy importante a evaluar en los NFRC es su durabilidad, aspecto poco estudiado y del cual puede observarse lo siguiente:

a) NFRC es más vulnerable, en términos de durabilidad, que otros compuestos de hormigón con fibras de otra naturaleza. La degradación está dada por la presencia de poros con agua alcalina en el hormigón que reaccionan con diferentes sustancias contenidas en las fibras.
b) El utilizar cementos especiales o adiciones al compuesto de sustancias que tiendan a neutralizar la alcalinidad de la matriz es válido para minimizar la degradación.
c) El utilizar agentes químicos en las fibras o en el compuesto puede ayudar a detener la degradación de las mismas en el medio cementicio.

Los factores que afectan las propiedades de las fibras naturales reforzando hormigones son variados, dependen incluso del país analizado, su clima y su

cultura constructiva. No obstante consideramos el análisis de diez factores, que de manera resumida se presentan en la siguiente Tabla:

Tabla No. VIII

Factores que Afectan las Propiedades de las NFRC

No.	Factores	Variables
1	Tipo de fibra	Coco, sisal, henequén, bambú, yute, madera, etc.
2	Geometría de la fibra	Longitud, diámetro, sección, anillos, ganchos finales
3	Forma de la fibra	Monofilamento, plegadas, torcidas, anudadas
4	Superficie de la fibra	Lisa, revestidas
5	Propiedades de la matriz	Tipo de cemento, tipo de agregado y su granulometría, aditivos
6	Diseño de la mezcla	Contenido de agua, laborabilidad, contenido de fibra
7	Método de mezclado	Tipo de mezcladora, secuencia de adicionar los constituyentes, método de adicionar las fibras, duración y velocidad de mezclado
8	Método de colocación	Vibrado convencional, lanzado, extraído
9	Técnica de hormigonado	Normal, a presión
10	Método de curado	Convencional, métodos especiales

- Comportamiento del Hormigón Reforzado con Fibras de Yute, Coco y Bambú.

Las características favorables, como fundamentales, que poseen los hormigones fibrorreforzados son: mejor ductibilidad, mayores resistencias flexo tensiónales, al impacto y a la factura, así como propiedades superiores de inhibición del agrietamiento y de resistencia al desgaste.

La gran resistencia a la tensión de las fibras de acero generalmente no es necesaria para las propiedades favorables del hormigón con fibras, siendo la relación de forma de la fibra (longitud/diámetro) y la fuerza de adherencia lo importante para las propiedades mejoradas del producto resultante. Por tanto, es obvio, considerar que las fibras orgánicas reúnen condiciones más que suficientes y trataremos a tres de ellas, propias de las regiones tropicales y subtropicales y que consideramos factibles de desarrollar aún más, estas son: yute, coco y bambú.

IV.4.1 - Estructura y Propiedades Físicas.

- Yute: Disponible en longitudes de hasta 8 metros, con diámetros variables de 20 a 100 µm. Son de diferentes colores que van desde el amarillo ligero hasta el café oscuro. La sección transversal de estas fibras es de forma aproximadamente poligonal y algunas veces con ángulos agudos en sus vértices.
- Coco: Generalmente de color café y con longitudes de 12.5 a 30 cm. La sección transversal es casi circular con diámetros que varían desde 200 hasta 250 µm.
- Bambú: Tienen diámetros de 15 a 20 µm, pero es muy difícil aislarlas individualmente. Se hayan en manojos compactos. La forma de la fibra casi siempre es poligonal con paredes exteriores gruesas.

La estabilidad dimensional de estas fibras vegetales se ha investigado mediante pruebas de ciclos de inmersión-secado durante períodos de 280 horas. Absorben agua hasta un rango del 120 al 180 % pero no son apreciables los cambios de volúmenes. Otra característica importante, y general para las fibras orgánicas, es su capacidad de retención de humedad, del orden del 95 al 145 % por peso, después de un ciclo de inmersión en agua y secado en aire.

IV.4.2 - Características de Resistencia.

Las características de resistencia a la ruptura y del alargamiento de las fibras de coco y yute se detallan a continuación:

Tabla No. IX

Resistencia a la Ruptura y Alargamiento de las Fibras de Coco y Yute

Estado de la Fibra al Momento de la Prueba	Carga Promedio Ruptura (g)	Esfuerzo (kg/cm2)	Reduc-ción de Esfuerzo (%)	Alargamiento (cm)	Alargamiento (%)	Reducción (%)
Fibra: Coco						
- Estado seco natural	558	1400	-	1.57	26.25	-
- Sumergida en Medio Alcalino durante 7 días (PH: 11)	538	1345	3.58	1.57	26.25	-
- Sumergida en Medio Alcalino durante 28 días (PH: 11)	530	1325	5.00	1.53	25.6	0.65
- Fibras Tomadas de Muestras de Hormigón Facturado	550	1375	1.43	1.56	26.0	0.25
Fibra: Yute						

- Estado seco natural	105.5	2260	-	0.077	1.28	-
- Sumergida en Medio Alcalino durante 7 días (PH: 11)	88	1885	17.0	0.063	1.05	0.23
Sumergida en Medio Alcalino durante 28 días (PH: 11)	72	1542	32.0	0.058	0.97	0.31
- Fibras Tomadas de Muestras de Hormigón Facturado	102.5	2195	2.9	0.075	1.27	0.01

De los resultados anteriores podemos inferir:

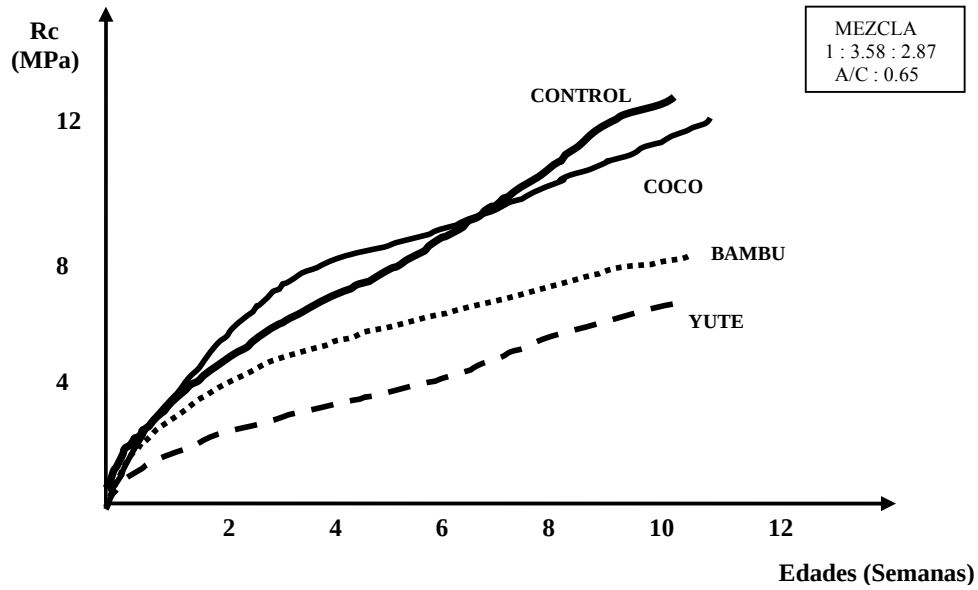
- Resistencias a la ruptura bastante elevadas.
- Pérdidas de resistencias al sumergirlas en el medio alcalino que varían en el coco en un 5 % y hasta un 32 % en el yute.
- Es significativo que las fibras en el medio real, el hormigón, mostraron sólo una pérdida parcial y pequeña de la resistencia.
- El porcentaje de alargamiento de las fibras de coco es grande y el de las de yute bajas.

Paralelo a estas pruebas se realizaron ensayos de dichas fibras sumergidas en solución de hidróxido de sodio y luego se chequeó el comportamiento de la micro estructura, la cuál no sufrió alteraciones altas, correlacionándose bien con los hallazgos de las pruebas de resistencia e indica que no es probable la ocurrencia de deterioro de las fibras en la mezcla de hormigón.

En cuanto a la resistencia en función del tiempo se han analizado dos situaciones para ensayos comparativos sobre los mismos parámetros, estos son:

1. Resistencia a compresión de hormigón con fibras con curado húmedo continuo y con un 1 % de volumen de fibras.

El gráfico resultante es:

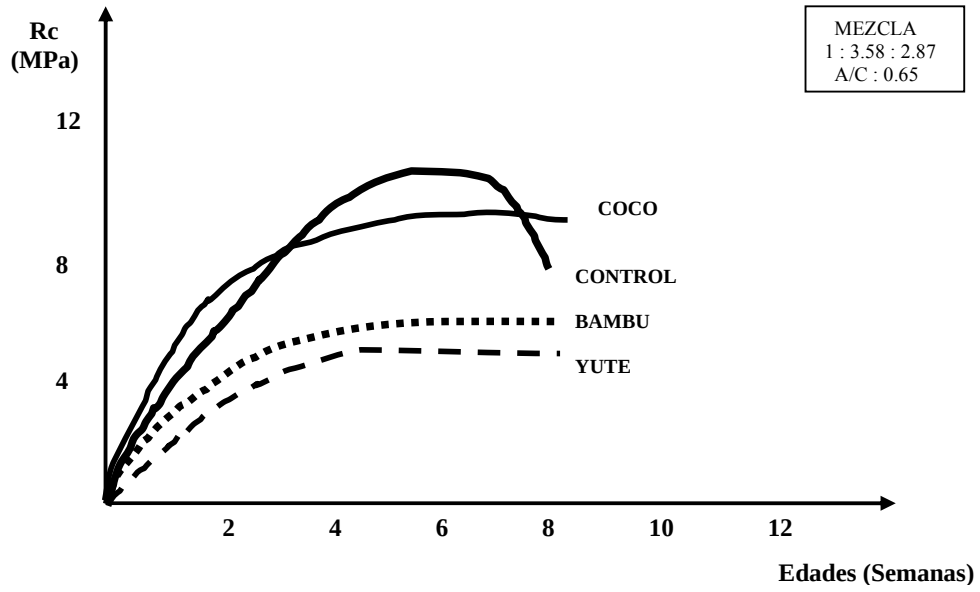


El hormigón con fibras de coco se comportó tan bien como el de control, pero las que contenían fibras de bambú y de yute tuvieron resistencias inferiores.

Resistencia a compresión de hormigón con fibras y curado húmedo sólo en los primeros

siete días y un 1 % de volumen de fibras.

Los resultados graficados son:



Podemos inferir que cuando se suspendió el curado húmedo después de siete días el hormigón simple sufrió alguna pérdida de resistencia a edades mayores mientras que los hormigones con fibras continuaron presentando pequeños incrementos de resistencia con el tiempo. Esto se atribuye a la posibilidad de disponer del agua que fue absorbida por las fibras en una cantidad importante para utilizarla en la hidratación del cemento en el tiempo, además otra razón de este comportamiento favorable es la reducida contracción de los hormigones fibrorreforzados por lo que inhibe la formación de micro fisuras y se obtienen mejores curados.

De manera general podemos considerar que siempre que sea necesario suspender el curado húmedo a edades tempranas la incorporación de fibras orgánicas en las mezclas pueden ofrecer ventajas.

En general las resistencias a la tensión y los módulos de ruptura de estas tres fibras fueron inferiores a los de los especimenes de prueba, excepto en el caso de las fibras de coco con un volumen del 1 %. Esta fluctuación negativa estuvo enmarcada entre el 5 y el 25 %.

En cuanto a la resistencia a la flexión la incorporación de fibras dotó al hormigón de una mejor relación respecto a la compresión como se puede analizar en los datos que se presentan:

Tabla No. X

Relación del Módulo de Ruptura de la RFlexión con la RCompresión

Tipo de Hormigón	3 días	1 semana	4 semanas	12 semanas
Control	0.14	0.19	0.20	0.22
Yute	0.17	0.24	0.26	0.28
Coco	0.17	0.22	0.22	0.26
Bambú	0.14	0.20	0.21	0.23

Vf: 1 %

Al realizar las pruebas de resistencia al impacto se determinó la energía de impacto a la primera fisura y el número de golpes sucesivos para la falla. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla No. XI

Resistencia al Impacto

Tipo de Hormigón	Energía a la Primera Fisura (kg/cm)		Número de Golpes Sucesivos para la Falla	
	Losas	Vigas	Losas	Vigas
Control	240	55	2	3
Yute	290	68	5	5
Bambú	275	61	3	3
Coco	290	68	4	4

Vf: 1 %

Consideramos que la energía de impacto está calculada como el producto del peso de la esfera por la altura de la caída.

Pudiéndose concluir lo siguiente:

- La energía de impacto para el primer agrietamiento del hormigón con fibras es más elevada entre un 10 y un 20 % que en ele caso de los hormigones que no lo poseen.

- Para la falla completa del elemento es mayor el número de golpes a aplicar cuando hay hormigones fibrorreforzados.
- La observación de los elementos ensayados indicó que los de hormigón simple exhibieron desintegración total y fragmentación, mientras que los de fibras se mantuvieron de una sola pieza, conservando su forma y continuidad.

Las contracciones que se evaluaron mostraron que los hormigones fibrorreforzados con yute a los 60 días poseían valores menores en cuantías del 50 % respecto a los de control y este valor fue del 70 % para los reforzados con coco.

IV.5 - Hormigón Reforzado con Bambú.

La posibilidad de utilizar bambú como un refuerzo adecuado para estructuras, temporales o rurales, ha sido estudiado profundamente en los últimos 40 años. En el epígrafe anterior se trató acerca de la evaluación de su uso en hormigones, no obstante es importante profundizar en los diseños de hormigones reforzados con bambú, máxime cuando se ha comprobado que pueden desarrollar entre dos y cuatro veces la capacidad portante a flexión de elementos no reforzados de iguales dimensiones. Además el bambú, especialmente en las regiones tropicales crece recta y rápidamente.

Durante la Segunda Guerra Mundial las fuerzas armadas de Estados Unidos y Japón utilizaron el bambú como refuerzo de hormigones, sustituyendo o disminuyendo, el empleo del acero. Este empleo ha continuado en un contexto más amplio y como meta generalmente deseable de mejorar y desarrollar técnicas constructivas basadas en materiales disponibles de la localidad. Del bambú existen unas 1250 especies y existe una gran familiarización con su empleo.

Los principales problemas en el empleo del bambú como refuerzo son: bajo módulo de elasticidad, su baja adherencia al hormigón, sus limitados rangos de diámetros y longitudes utilizables de la caña y sobre todo la amplia variabilidad del contenido de humedad.

Debe considerarse al diseñar con bambú como fundamental:

1. Mayores peraltes totales en comparación con el hormigón reforzado con acero.
2. Refuerzo sólo en la base (momento positivo o de pandeo).
3. Necesidad de tratar la superficie del bambú para inducir una estabilidad de humedad y de adherencia.
4. Extensión limitada de la luz en las losas en una dirección (longitud sugerida máxima de 3 a 6 m) diseñadas para cargas comparativamente ligeras y evitando problemas de cortante y adherencia.

IV.5.1 - Selección y Tratamiento de la Superficie de Bambú.

La humedad que puede absorber el bambú y que trae aparejados cambios de volumen a tratado de ser evitada con tratamiento superficial; cuando este no se ha dado o ha sido deficiente se producen grandes fallas en su uso. Por tanto es fundamental el tratamiento superficial para lograr el adecuado comportamiento en el tiempo del hormigón reforzado con bambú.

Los tratamientos superficiales que se han logrado no han reunido las dos premisas de ser adecuadas y económicamente viables por lo que se continua trabajando en esta línea.

A su vez, como condicionales de diseño y atendiendo a los inconvenientes propios del bambú como elemento orgánico (diferentes tamaños, estado de secado en que se encuentre, diámetros no uniformes, variabilidad de grosor, etc.) que se proponen son:

- Las cañas enteras se limiten a usarse como refuerzo secundario.
- Todo refuerzo principal debe constituirse de medias cañas con los nudos expuestos hacia arriba para incrementar la adherencia. Convienen especies de bambú con muchos nudos.
- Para evitar el contenido excesivo de humedad, todas las cañas deben cortarse aproximadamente a unos 50 cm arriba del nivel del suelo, apilarse verticalmente para el secado y secarse hasta obtener un contenido de humedad cercano al 20 % antes de aplicar el tratamiento superficial.
- Cada media caña después de secada debe protegerse contra la humedad y tratarse para que adquiera adherencia, esto se logra

sumergiendo ambos extremos a un adhesivo (unos 250 mm). A continuación se pueden rociar ambos extremos con arena gruesa limpia, removiéndose el exceso de material. Para este tratamiento se considera que las resinas de poliéster son menos costosas e igualmente efectivas que las epóxicas. Para reducir el costo a ambas se les puede aumentar el volumen incorporándoles arena fina o polvo de sílice.

- Se recomienda que los extremos de las medias cañas sean enteras en longitudes sobre los 30 cm para proporcionar anclaje en el extremo del refuerzo.
- Luego del anterior tratamiento debe sumergirse el resto de la media caña, durante cuatro días, en un sellador adecuado de poco costo y sin incluir los extremos que deben sobresalir del baño de inmersión. Se recomienda una mezcla de 1:1 de aceite de linaza y aguarrás o betumene-querosina.
- Para el refuerzo secundario, cañas enteras, estas pueden sumergirse en el sellador sin el tratamiento de los extremos.

IV.5.2 - Relación Luz/Peralte y Esfuerzos de Diseño.

Debido a los bajos valores del módulo de elasticidad y a posibles esfuerzos de adherencia bajos es que está indicado un enfoque conservador en las relaciones luz/peralte. Se recomienda:

Relación Luz/Peralte

- Losas sólidas
  - De apoyo sencillo 27
  - Continuas o fijas 30
- Losas con huecos
  - De apoyo sencillo 25
  - Continuas o fijas 27

Además se sugiere:

- Reducir el peso de la losa cuando los claros sean de más de 5 m.
- Por los problemas de adherencia local, las losas simplemente apoyadas de 5 a 6 m, deben tener mayor peralte y la media caña debe llegar hasta el apoyo.

- Anclaje mínimo más allá del punto de apoyo aproximadamente de 150 a 200 mm.

Los valores de diseño sugeridos se exponen en la Tabla No. XII y se basan en el diseño elástico y en la igualdad de los módulos del hormigón y del bambú. Esta última suposición puede ser revisada ligeramente para las diferentes variedades de bambú.

Tabla No. XII

Valores de Diseño Sugeridos para el Bambú

Valor de Diseño	Fórmula	Valor Numérico
- Esfuerzo de tensión en el bambú (kg/cm2)	f_{tb}	400
- R´bk (kg/cm2)	U_{28}	200
- Esfuerzo de flexión permisible del hormigón (kg/cm2)	P_{cb}	70
- Esfuerzo de cortante permisible del hormigón (kg/cm2)	Q/lab	5.6
- Anclaje mínimo	-	200 – 500
- Esfuerzo de adherencia local permisible (kg/cm2)	Q/laO	10
- Factor del eje neutro		0.15
- Factor de brazo de palanca		0.95

Puede realizarse el diseño obviando los aportes del bambú, estando entonces totalmente del lado de la seguridad.

- Sugerencias Para la Construcción.

Las medias cañas sujetas con alambre o cañas enteras forman por si mismas una construcción relativamente rígida. Cuando este emparrillado se apoya a intervalos de aproximadamente 30 cm, no sólo sostiene sobrecargas concentradas de construcción sino que si se suspende del emparrillado un tejido puede utilizarse como cofre.

El hormigón debe depositarse cuidadosamente y vibrarse mecánicamente, de preferencia con vibradores pequeños de baja potencia.

El mayor desarrollo constructivo utilizando el bambú se encuentra en Asia, donde se emplea como un material ordinario de construcción.

V.6 - Durabilidad de las Fibras Orgánicas en Hormigones.

El interés en usar fibras naturales en hormigones es creciente, debido a:

1. Necesidad vital para la mayoría de la población, fundamentalmente en los países subdesarrollados, en los cuales no está a su alcance económico el usar técnicas constructivas más desarrolladas.
2. Limitar las importaciones e ir hacia el uso de los recursos locales.

Muchas soluciones en este campo han sido encontradas, básicamente en lo referido a elementos de paredes y techos, algunas más exitosos que otros pero en general con la dificultad del deterioro de las fibras vegetales dentro de la matriz cementicia.

Los mecanismos que provocan el deterioro de las fibras orgánicas y cómo evitarlo es objeto de intensos estudios y discusiones por parte de muchos investigadores.

IV.6.1 - Referencias Acerca de las Fibras y su Durabilidad.

Las fibras naturales han sido usadas en las construcciones desde que el hombre pensó en cobijarse y las tomó del medio que lo circundaba. Ya en el pasado siglo las retomó para usarlas dentro de la matriz cementicia, tal es el caso del bambú, la madera como fibras de celulosa, las fibras de liber y las fibras de hojas.

El bambú está siendo usado como refuerzo de losas de hormigón eliminando o disminuyendo aceros. Los problemas de durabilidad en este están asociados a los cambios de volúmenes y el consecuente agrietamiento junto con la baja adherencia fibra-matriz. Las formas de atemperar estas dificultades fueron estudiadas con anterioridad.

Considerable atención han tenido las fibras de celulosa, particularmente a partir de la Segunda Guerra Mundial y en función de sustituir las fibras de asbesto. La experiencia indica resultados buenos en algunos casos y no tanto en otros. En los años 70 los efectos dañinos de las fibras de asbesto a la salud humana fueron puestos en claro y se comenzaron a encontrar otras soluciones alternativas a la producción de asbesto-cemento. Tal es el caso de Finlandia donde las producciones de asbesto-cemento han sido reemplazadas por fibras de celulosa en combinación con pequeñas cantidades de fibras de polipropileno. En otros países como Dinamarca, Gran Bretaña y Australia os productores de asbesto-cemento han desarrollado productos de cemento con fibras de celulosa en autoclaves y su durabilidad ha sido reportada como excelente.

Las fibras de madera han sido usadas como matriz cementicia por más de 50 años para diferentes usos pero poseen una baja capacidad resistente lo cual ha particularizado su uso. Realmente el problema mayor que poseen estos compuestos está en su proceso de fabricación ya que las fibras de madera no pueden contener sustancias que afecten la reacción con el cemento. En muchas oportunidades las fibras de madera reciben un pretratamiento, hacia este fin están encaminadas las investigaciones y se busca usar la mayor cantidad posible de especies diferentes de madera.

Es a finales de la década del 60 del pasado siglo, que comienzan las investigaciones para conocer la factibilidad de usar fibras orgánicas como refuerzo de tejas delgadas, dando resultados positivos y rápidamente se desarrolló una tecnología de fabricación de tejas con fibras orgánicas a través de la IT Building Materials Workshop de Gran Bretaña en Centro América, África y Asia, suman más de 28 países los que la desarrollan.

El aspecto medular de todas las investigaciones anteriores estriba en la durabilidad. Diferentes investigadores reportan el debilitamiento de las características tensomecánicas de los hormigones y morteros fibrorreforzados con fibras orgánicas a diferentes edades, éste es su talón de Aquiles.

Dentro de las fibras más usadas y estudiadas está el Agave Siselana, conocido comúnmente como sisal, a este nos referiremos ya que es un ejemplo representativo de lo que ocurre a las fibras vegetales en la matriz cementicia.

IV.6.2 - Hormigón con Fibras de Sisal. Modelo de Descomposición.

Para poder comprender adecuadamente que sucede en el proceso de descomposición del sisal en el medio cementicio es conveniente conocer que es este y que sucede al formarse el hormigón.

- Estructura del Sisal.

El sisal es una planta de hojas que puede alcanzar hasta 1.5 m de longitud y dicha hoja puede tener entre un 3.5 y un 5 % de fibras propiamente. El diámetro de las fibras es menor de 0.2 mm y formar células unidas entre si por hemocelulosa, lignina y pectina; estas células consisten en un número de paredes con diferentes posiciones geométricas de las fibrillas componentes. Las proporciones son:

- Hemocelulosa……12 %
- Pectina…… 1 %
- Lignina……... 10 %

La lignina es la principal sustancia unificadora.

- Estructura del Hormigón.

El hormigón es un compuesto de diferentes tipos de agregados pétreos, cemento y agua. El llamado gel de cemento está conformado por la unión de cemento con el agua y el más común cemento en el mundo es el llamado Pórtland con partículas aproximadamente de 10 μm.

El gel de cemento va a dar lugar a que en el se produzca la hidratación del cemento, mediante un proceso de reacciones químicas que podemos subdividir en cinco estados:

I – Estado Inicial.

Dura aproximadamente 10 minutos (en condiciones de laboratorio) y en él son liberadas las sustancias que más fácilmente se solubilizan. En el agua se pueden encontrar Ca2+, OH-, K- y Na+. Una fina membrana, la cual es rica en S1O2 es formada alrededor de los aluminatos de calcio.

II – Segundo Estado.

Llamado el estado durmiente dura sobre dos horas. Aumenta la concentración de Ca2+, OH-, K- y Na+ en la fase líquida y decrece el SO2-4. Cuando la concentración de OH- y Ca2+ se ha incrementado a cierto nivel los componentes químicos en la membrana alrededor de los minerales del cemento son convertidos en largos cristales y los minerales del cemento comienzan a hidratarse nuevamente.

III – Tercer Estado.

Se le conoce por estado acelerado y dura unas 24 horas. Las ligaduras de cemento y los cristales de hidróxido de calcio son precipitados. La formación de un mineral coloidal, gel de cemento e hidróxido de calcio comienza. La hidratación ocurre aceleradamente.

IV – Cuarto Estado.

Estado de desaceleración, tiene lugar sobre los 28 días. La secuencia de hidratación es retardada principalmente debido a que la concentración de Ca2+ en la fase líquida decrece y es obligado a precipitar con el incremento de iones OH-. Los iones K+ y Na+ se incrementan constantemente durante los primeros cuatro estados con el resultado de ser totalmente liberados después de 28 días.

V – Quinto Estado.

Estado último o de estabilización; en el decrece la intensidad de la hidratación. El enrejado de cristales formado en los estados anteriores es refinado y densificado. El líquido disperso es menor y el proceso de hidratación continua con mayor dificultad. Algunos científicos plantean que partículas mayores de 60 um nunca se llegan a hidratar totalmente. Este estado se mantiene en función del tiempo con una gran estabilidad.

La porosidad del gel de cemento es aproximadamente del 28 %. Si la relación agua-cemento es reducida o si el grado de hidratación es incrementado la proporción de poros capilares es reducida. La porosidad del hormigón es normalmente menos del 20 % en volumen.

Además de lo anteriormente descrito el dióxido de carbono disponible en el aire reacciona con los productos de la hidratación del cemento, este proceso es

llamado carbonatación, se desarrolla lentamente y es determinado por la concentración del dióxido de carbono que exista en el aire, la permeabilidad de la matriz, la humedad del hormigón, la temperatura y el número de cambios de humedad y temperatura que ocurra. La carbonatación del hormigón es más probable de darse por la alta humedad relativa en los poros del sistema de la matriz cementicia, el alto contenido de dióxido de carbono en el medio ambiente y las altas temperaturas.

Estamos entonces en condiciones de estudiar el modelo asumido de las fibras de sisal en ambientes alcalinos. Esto ocurre ya que la descomposición de la celulosa en ambiente alcalino tiene lugar en concordancia con dos mecanismos diferentes:

1. Mecanismos de descortezado de la fibra los cuales ocurren al final de los cambios moleculares (sisal + OH- ….. –CH2OH, ácido isosaccharinico). Grupos terminales son liberados en esta forma constantemente y estos grupos ácidos no son estables en soluciones alcalinas.
2. Descomposición de la celulosa mediante hidrólisis alcalina. Ocurren divisiones moleculares que hacen que el grado de polimerización decrezca. No ocurre hasta temperaturas mayores de 100 ^{o}C.

La descomposición de la hemocelulosa en el ambiente alcalino ocurre en igual forma que la celulosa. En el caso de la lignina está compuesta por unas largas moléculas tridimensionales cuya estructura no es bien conocida, es una sustancia aromática, rota fácilmente en el medio alcalino y es coloreada de amarillo y carmelita cuando se oxida. Este proceso se acelera a 70 – 80 ^{o}C y ya a 120 ^{o}C está concluido.

Podemos concluir entonces en que la causa primaria de los cambios en las características de las fibras de sisal en el hormigón es asumida debido a la descomposición química de la lignina y la hemocelulosa. Los poros de agua alcalina rompen la unión entre las células individuales de fibra. La larga fibra de sisal se convierte en numerosas y pequeñas células que pierden su capacidad resistente en el hormigón. Los lugares vacíos (lumen de la fibra) son llenados por hidróxido de calcio y las fibras pierden su flexibilidad.

Han sido estudiados dos métodos fundamentales para analizar la pérdida de la capacidad de la capacidad resistente:

1. Fibras de sisal almacenadas en soluciones químicas con valores diferentes de PH.
2. Observaciones a elementos construidos de hormigón fibrorreforzado con sisal. Este método se ha trabajado con:
    a. Especimenes almacenados en ambiente seco.
    b. Especimenes almacenados en ambiente húmedo.
    c. Especimenes almacenados alternativamente en ambientes secos y húmedos.
    d. Especimenes almacenados a puertas cerradas.
    e. Especimenes sujetos a agentes acelerantes.

Los niveles de análisis y discusión sobre la temática de la durabilidad del sisal en hormigones, por parte de la comunidad científica, ha llevado a plantear, sin pretender ser concluyentes:

- La descomposición en el medio alcalino se produce por dos mecanismos: descortezado e hidrólisis.
- Una posible explicación al debilitamiento de la fibra de sisal en el hormigón es la descomposición química de la lignina y la hemocelulosa combinada con una “mineralización” de la fibra por hidróxido de calcio depositado en la misma.
- Las fibras de sisal en el hormigón, cuando la alcalinidad es baja y no existe hidróxido de calcio no se descomponen química ni biológicamente.
- La degradación de fibras de sisal en una matriz alcalina de cemento es pequeña en humedad constante o ambientes secos.
- Si el hormigón fibrorreforzado con sisal es sometido a cambios de humedad la degradación de las fibras puede tener lugar.

IV.6.3 – Métodos para Contrarrestar el Debilitamiento de las Fibras de Sisal en Hormigones.

Se han estudiado los siguientes métodos:

I – Impregnación de las fibras con agentes bloqueadores.

Consiste en impregnar la fibra con agentes que pueden reaccionar con ciertos componentes y dar como resultado otros los cuales son difíciles de disolver en un ambiente alcalino.

Han sido planteados diferentes agentes bloqueadores, entre estos están:

- Silicato de Sodio ($Na_2S_1O_3.9H_2O$).
- Sulfito de Sódio ($Na_2SO_3.H_2O$).
- Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$).

  Y otros magnesios, hierros, sales de barium, antioxidantes, etc..

II – Impregnación de las fibras con agentes repelentes al agua.

Lo que se busca con este tratamiento de la fibra es que los poros de agua alcalinos no puedan llegar a esta y entonces no ocurran las reacciones internas.

Los tratamientos han sido dados con resinas epóxicas y de poliésteres, productos bituminosos, barnices, PVA, asfaltos y otros. De esta forma se reduce la interacción entre las fibras y la matriz. El proceso de debilitamiento se hace mucho más extenso pero no puede ser evitado totalmente.

III – Impregnación de las fibras con agentes bloqueadores y repelentes al agua.

Es una combinación de las dos anteriores. Las fibras primero son impregnadas con agentes bloqueadores, por ejemplo ácido bárico, nitrato y nitrito de potasio, sulfato de magnesio, cromato de sodio, etc y luego son impregnados con agentes repelentes al agua tales como esterato de sodio y cromo, ácido esterático y PVC.

Los resultados obtenidos con la impregnación del sisal con ácido esteárico o nitrato de barium han tenido un efecto favorable tendiendo a retardar el efecto del debilitamiento. Con el anterior tratamiento en cuatro años las fibras aún no poseían su capacidad resistente dentro del hormigón.

IV – Acciones relacionadas con la matriz cementicia.

a) Sellado de la matriz.

Consiste en reducir o eliminar completamente el sistema de poros de la matriz. De esta forma se busca que no exista el transporte de poros de agua alcalina hacia la fibra.

La permeabilidad del hormigón puede ser influenciada por mayor cantidad de finos, incrementando el contenido de cemento, adicionando polímeros, silicones o esteratos en el agua. Otro método utilizado es adicionar pequeñas cantidades de cera al conformar la matriz. También se ha ensayado el sellar el sistema de poros al adicionar al hormigón esterato de zinc.

Ninguno de estos métodos es capaz de eliminar completamente el debilitamiento de la fibra de sisal en el hormigón.

b) Efectos de reducción de la alcalinidad.

El valor del PH en los poros de agua del hormigón normalmente excede de 13. Una forma de disminuir la degradación está asociada con tratar de bajar dicho potencial de hidrogeno a valores por debajo de 12 – 12.5.

Se trata de adicionar al hormigón sustancias que bajen el PH tales como cenizas o usando cementos aluminosos pero esto es altamente costoso por lo que es más apropiado el uso de puzolanas.

V – Combinación de impregnación de fibras y cambios en la matriz cementicia.

Es función de lo explicado anteriormente y ha dado resultados halagüeños en experiencias por cuatro años.

A manera de resumen podemos plantear:

- Las fibras de sisal reforzando hormigones almacenados en un clima tropical muestran un marcado debilitamiento a edades tempranas y sobre los 200 días.
- La degradación de las fibras de sisal es debida a la alcalinidad del medio cementicio, reaccionando con componentes de las fibras de sisal. De esta forma su capacidad resistente decrece.

- El movimiento de los poros de agua alcalinos dentro del hormigón es muy influenciado por la humedad y la temperatura ambiente.
- Reemplazando sobre el 45 % del cemento con agregados finos se reduce el valor del PH lo cual incide positivamente en el no debilitamiento de la fibra.
- Es posible reducir la degradación de la fibra de sisal en el medio cementicio sellando el sistema de poros de la matriz e impregnando la fibra con diferentes sustancias.

CAPITULO V: INVESTIGACIONES ACERCA DEL COMPORTAMIENTO DEL FIBREQUÉN EN HORMIGONES Y MORTEROS.

V.1 - Reseña Histórica del Henequén.

El henequén, cuyo nombre científico es AGAVE FOURCROYDES, es una planta de hojas verdeazuladas, muy carnosas, lanceoladas y largas, que terminan en una punta resistente que mide de tres a cuatro centímetros de largo. Su tallo es un rizoma de cuyas ramificaciones nace un corto eje vertical, alrededor del cual se desarrollan las hojas en forma de roseta. Su cultivo demanda de pocas atenciones culturales, en terrenos calcáreos y de buen drenaje, sin arbustos ni malezas, estando por tanto las plantaciones bien soleadas y aireadas.

Es oriundo de Yucatán, México, donde se cultivaba a la llegada de los españoles. México y Cuba son los mayores productores mundiales, existiendo áreas cultivadas en Centroamérica y el Caribe.

A mediados de la década del 50 del pasado siglo se comienzan a traer de Yucatán plantas de henequén a Cuba, pero no es hasta 1903 que se oficializan las plantaciones en Matanzas, Nuevitas e Itabo para desarrollar la fabricación de sogas y cordeles. Esta industria después de una breve estancia en Talla Piedra, Ciudad Habana, se establece definitivamente en Matanzas en 1911; ejecutando la inversión la compañía “Raffloer Erbsloh y Cia”, con capital alemán y aún hoy es única en el país.

Con miras a eliminar las importaciones de la fibra yucateca, como materia prima, se desarrollan reas de cultivos en Mariel, Habana y en Jaragua, Cienfuegos, en la década del 40. Es en la provincia de Matanzas donde alcanza su mayor desarrollo dicho proceso agroindustrial, siendo actualmente el 70 % de la producción nacional.

En Cuba existen cinco desfibradoras: tres en Matanzas, una en Juragua y otra en el Mariel. La clasificación que hacen de las fibras esta basada en longitud y color, en función de:

.Clase A: Fibras de longitudes entre 90 y 100 cm o más.

.Clase B: Fibras con longitudes entre 80 y 90 cm.

.Clase C: Fibras con longitudes entre 70 y 80 cm.

.Clase D: Fibras con longitudes menores de 70 cm y otras de mayor longitud pero

que presentan manchas y sin afectaciones físico estructurales.

Las fibras clases A, B y C van a la Fca. de Sogas y Cordeles. En el caso de las fibras clase D tienen diferentes usos, básicamente en las industrias locales, pero en ningún caso como materia prima de una producción estable, por tanto ‘sta fue la seleccionada para la investigación, pues puede considerarse un desecho de la producción fundamental, de la cual también pueden obtenerse otras fibras, que dada su corta longitud no clasifican y a las que se les llama fibrillas. El precio por tonelada de fibras esta en dependencia de la clase.

A partir de la década del 90 el cultivo del henequén ha tenido búsqueda de nuevos desarrollos en Cuba, destinado a alcanzar niveles de producción mayores, tanto en las zonas tradicionales como en el fomento de nuevos sembrados en Jibara, Holguín. Este nuevo desarrollo está asociado a la diversificación de usos que se le está dando a los productos que se obtienen de la planta y dentro de los que encuentran la ecogenina para la medicina, como hilos de suturas quirúrgicas, el jugo como tenso activo y detergente, las fibras para la construcción, las cuáles debidamente dosificadas en longitud y volumen reciben la denominación de Fibrequén y todo lo anterior independiente del empleo tradicional: sogas y cordeles.

V.2 - Caracterización del Fibrequén.

La composición básica está dada por:

Celulosa..... 65 %

Hemicelulosa..... 12 %

Lignina..... 10 %

Otras..... 13 %

Los análisis practicados en las cenizas de hojas de henequén arrojan un contenido entre 4 y 5 % de fósforo y entre un 7 y 8 % de potasio. Su humedad propia a temperatura ambiente es del 12 %.

Las características fundamentales son:

- Diámetro..... 0.1 - 0.5 mm
- Densidad promedio..... 1890 kg/m3
- Densidad lineal..... 51.8 tex (g/km)
- PUS (para di metro medio)…..... 733 kg/m3
- Resistencia a la tracción……. ÷ 320 Mpa
- Modulo de elasticidad (E)…….. ÷ 32 x 10^3 MPa
- Alargamiento a la rotura……..... ÷ 4 %
- τ media de adherencia..... ÷ 1 - 2 MPa
- Punto de ignición..... 300 – 349oC
- Conductividad térmica..... No Posee
- Conductividad eléctrica..... No Posee

Para las plantaciones matanceras de henequén el diámetro promedio es de 0.3 mm, con el cual se trabaja para determinar relaciones básicas del Fibrequén, estas son:

a) Relación de forma para diferentes longitudes, dados los criterios explicados para la determinación de los intervalos de la experimentación.

U.M.: mm

	13	25	38	51	64	77	90	103
lf/df	43	83	127	170	213	257	300	343

b) Eficiencia (S), fracción de volumen de refuerzo (Vf) y superficie especifica (Se).

Trabajando con las ecuaciones (11), (23) y (29) para determinar S, Vf y Se respectivamente y para diferentes dosis según los criterios explicados al determinar los intervalos de experimentación del Fibrequén en la matriz cementicia se tiene:

	Dosis (KgF/m^3 H)					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
S (mm)	15.9	11.2	9.2	7.9	7.1	6.5
Vf (%)	0.07	0.14	0.21	0.27	0.34	0.41
Se (cm-1)	0.09	0.19	0.27	0.36	0.45	0.55

c) Longitud mínima en matriz de hormigón.

Considerando la formula (5) se obtiene lm = 9.66 mm que no es más que el largo mínimo necesario para que no desprenda de la matriz al aparecer la primera fisura. Las longitudes de Fibrequén a emplear deben ser mayores de 9.66 mm.

d) Volumen de fibras critico.

Evaluando para el Fibrequén la fracción de volumen de refuerzo mínimo necesario para que haya un trabajo conjunto del material después de la primera fisura se obtiene que es Vf min = 0.04 %. Por tanto no es posible emplear fracciones de volúmenes de refuerzo menores de 0.04 %.

V.3 - Desarrollo de las Investigaciones.

En función de la experiencia mundial se partió de la hipótesis: “La presencia de Fibrequén en hormigones y morteros, convenientemente dosificado y para una longitud dada, influye en los valores de su resistencia a flexión y compresión”.

Se valida el efecto que causa en las resistencias medias de hormigones y morteros la presencia o ausencia de Fibrequén para tres momentos del tiempo: a los 3, 7 y 28 días contados a partir de la preparación de las muestras de hormigón y 7 y 28 días en el caso de los morteros.

Se someten a análisis dos factores, las fibras con dos niveles: ausencia de fibras y un kilogramo de fibras de 38 mm de longitud por metro cúbico de hormigón, en los morteros se consideran fibras de 19 mm e igual dosis. El segundo factor es el tiempo. No interesa medir el efecto del tiempo en general sino el efecto de la presencia de la fibra en la resistencia en tres o dos momentos, lo que introduce una discontinuidad en esta variable que la hace discreta.

Esta disgregación es importante porque permite asumir que los efectos a estudiar no serán valores aleatorios de la variable resistencia, sino los valores fijos aunque desconocidos que ella asume ante las diferentes combinaciones controladas de los factores a estudiar.
Se desea analizar por tanto el efecto del factor fibra y el del factor tiempo, así como la combinación de ambos. Se asume que la relación entre el efecto observado y los factores es lineal.

Conociendo que las demás variables que influyen en la resistencia son comunes en las muestras con y sin fibra, la esencia del problema consiste en docimar Ho : $\alpha_1 = \alpha_2$, donde α_i ser el efecto de la ausencia o presencia de la fibra; comparando el efecto del error aleatorio no controlado con el posible efecto del factor analizado a un nivel dado.

Las unidades experimentales, para el hormigón, serán probetas cilíndricas de 15 x 30 cm y vigas rectangulares de 11 x 11 x 44 cm o briquetas para el mortero de 4 x 4 x 16 cm, para la confección de éstas se preparó una experimentación para satisfacer los requerimientos del análisis y sobre la base

de las normas cubanas, manteniéndose como constantes controladas las siguientes variables:

- Resistencia para el diseño de la mezcla de hormigón de 25 MPa.
- Procedencia del cemento: Fca. Carlos Marx.
- Procedencia del rido grueso: Cantera Antonio Maceo.
- Procedencia del rido fino: Cantera Regalito.
- Calidad del cemento: P 350.
- Calidad de la fibra: Clase D.
- Procedencia de la fibra: Emp. Henequenera “Eladio Hernández”.
- Tamaño de la fibra: 38 mm (hormigón) y 19 mm (morteros).
- Dosificación de la fibra : 1 kg/m^3
- Relación agua-cemento: 0.54.
- Relación cemento-arena en morteros : 1:2
- Tiempo de mezclado: 3 minutos después de añadida la fibra.
- Capacidad de la hormigonera: 50 lts.
- Curado: inmersión en agua.

Se realizaron las mediciones de las resistencias en un mismo equipamiento, debidamente homologado por el Comité Estatal de Normalización. El mismo grupo de operarios llevó a cabo las mediciones, garantizándole homogeneidad a toda la etapa de preparación de las muestras y los ensayos. Las variables controladas fueron las mismas, especificándose las variaciones que se efectuaron en función de los objetivos a lograr.

Las características fundamentales de los áridos y el cemento empleados en la investigación se pueden ver en la Tabla No. XIII.

Los resultados de los ensayos, realizados sobre la base de las Normas Cubanas se muestran en la Tabla No. XIV. Para la compresión (Tabla No. XIV) los resultados del análisis de varianza muestran un efecto de la interacción del Fibrequén y el tiempo, ya que no son significativas las diferencias para todas las edades entre las poblaciones con y sin fibras. A los 28 días para un 91 % de confianza se reconoce el efecto positivo del Fibrequén, ya a los 3 días hay que aceptar la hipótesis nula siendo α_1 igual a α_2, lo que responde a un comportamiento similar en las resistencias a compresión para hormigones con

y sin fibra. Los resultados a los 7 días alcanzan los niveles más altos de confianza.

Luego se concluye que los efectos producidos en la resistencia a la compresión en hormigones por la adición de Fibrequén se modifican durante el proceso de endurecimiento de la mezcla, resultado que puede extenderse a los morteros (Tabla No. XIV), aunque no se manifiesta con la misma fuerza el efecto de la interacción entre los factores estudiados, tanto para los hormigones como para los morteros, aceptándose para todas las edades con niveles adecuados de confianza la hipótesis alternativa.

Las muestran ensayadas a flexión muestran estabilidad con sus resultados para las diferentes edades; el efecto positivo se manifiesta sin variaciones bruscas a las distintas edades, lo que asevera que la presencia de Fibrequén mejora en adición la resistencia a la flexión que a la compresión simple, cuestión que caracteriza al material. El efecto producido por la fibra difiere para cada una de las variables estudiadas.

Se valida favorablemente la hipótesis de partida y se reconoce el aporte favorable del Fibrequén a variables tales como resistencia a la flexión y la compresión de hormigones y morteros.

Otro grupo importante de par metros fueron evaluados en esta etapa de la investigación y fueron:

- Fisuración. Los hormigones y morteros fibrorreforzados presentaron un 95 % de menor agrietamiento que las muestras de control y a su vez estas grietas fueron de menor abertura, profundidad y longitud.
- Consistencia. Los hormigones con Fibrequén tienen menores asentamientos.
- Permeabilidad. Los hormigones fibrorreforzados con Fibrequén fueron impermeables en las condiciones ensayadas.
- Densidad. Comparativamente, en las condiciones ensayadas, la cuantía de la densidad disminuyó a razón de 46 kg/m^3.
- Abrasión. Se obtuvo un 25 % menos de desgaste en los hormigones que poseían Fibrequén.

- Absorción. Fue de un 2 % menor a los 90 días y un 4 % menor a los 28 días para los hormigones fibrorreforzados.

Es de importancia el trabajo conjunto del Fibrequén con la masa pétrea, dada por el hormigón o el mortero, siendo básico para el adecuado comportamiento fibra-matriz en función de la adherencia y la compatibilidad de las deformaciones y que en la investigación fue ratificado para diseños de mezclas de hormigón de medianas resistencias (entre 15 y 20 MPa).
Resumiendo la etapa de evaluación del material fibrorreforzado los resultados fundamentales referidos al Fibrequén son:

- Convenientemente dosificado en peso y tamaño proveen a los hormigones y morteros de un refuerzo casual y tendiente a la tridimensionalidad.
- Se distribuye mediante un proceso normal de mezclado.
- Puede usarse como refuerzo secundario en hormigones y morteros.
- Mejoran las resistencias asociadas a la compresión y la flexotracción.
- Evita la retracción por fraguado por lo que elimina en m s de un 95 % la fisuración que se produce por este concepto.
- Poseen menores densidades, absorción y desgaste.
- Ayudan a aumentar la impermeabilidad.
- Existe la adherencia adecuada entre el Fibrequén y la matriz que permite que no se desprenda la fibra al aparecer la primera fisura.
- Fácil manipulación y transportación del Fibrequén.

V.4 - Análisis de Hormigones y Morteros Fibrorreforzados con Fibrequén.

Validada la hipótesis de partida acerca de la influencia, por demás favorable, de la presencia de Fibrequén con dosificación y longitudes fijas, se abre entonces una nueva etapa de investigación. El objetivo básico de la misma es poder conocer cuales son las dosis y longitudes óptimas en hormigones de resistencias medias fibrorreforzados con Fibrequén y a los cuales se les varían conjuntamente las dosis de fibras en las mezclas y las longitudes de éstas, por considerar como aspectos fundamentales a los mismos (dosis y longitud) en el comportamiento del material compuesto.

Se diseñó una experimentación en la cual se tomaron como parámetros dependientes a medir las resistencias a compresión, flexión y tracción indirecta de los especimenes de prueba. Las variables controladas se mantuvieron, excepto la resistencia en el diseño de mezclas de hormigón que fue de 15 MPa. Los parámetros independientes que se analizaron fueron las dosificaciones y longitudes del Fibrequén, a razón de:

- Dosificaciones (kgf/m^3 h) : 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3.
- Longitudes (pulgadas) : 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3,5 y 4.

Los intervalos escogidos en cada caso han estado determinados por:

- Dosificaciones.

  .Variación estable de los incrementos.

  .Aumentar el rango de dosis hasta que por razones prácticas se hiciera inoperante el mezclado (excesiva cantidad de fibras por metro cúbico con la consiguiente demora y dificultad de operación) así como que existiera una disminución en la laborabilidad al aumentar la relación de superficies.

  .No propiciar el efecto de boleo en el compuesto a partir de analizar fracciones de volúmenes superiores a la critica.

- Longitudes:

  .Variación estable de los incrementos.

  .Posibilidad correcta del corte de fibras.

  .Garantizar estar en todos los casos sobre la longitud mínima, con lo cuál no se producen desprendimientos de las fibras de la matriz y se trabaja como un material compuesto.

  .Evitar el efecto de boleo. Este se produce básicamente por el aumento de la longitud de la fibra.

Con los resultados obtenidos se plantea la búsqueda del modelo matemático que describa el comportamiento de la resistencia a la compresión a los 28 días

en el entorno de dosis y longitudes señalados y que nos sirviera para buscar los óptimos de las mismas.

Utilizamos el método de regresión lineal múltiple con la ayuda de paquetes computacionales. Se ensayaron varios modelos polinomiales y el que mejores resultados mostró fue el modelo cuadrático de la forma:

$$R_c = R_m^{\ 2} + b_1 l + b_3 D^2 + b_4 Dl + b_5 l \qquad (32)$$

donde: Rc : resistencia a la compresión (MPa)
Rm : resistencia media proyectada (MPa)
D : dosificaci¢n (kgF/m3H)
l : longitud (pulgadas)

y para el caso de los ensayos realizados de resistencias de 15 MPa se tuvo que:

Rm = 14.57724, b_1 = 5.662489, b_3 = 0.7292458,

b_4 = - 0.6471171 y b_5 = - 1.085607

Dicho modelo aparece en el Gráfico No. 1 y del mismo se tiene:

- La resistencia aumenta al aumentar las dosis.
- Para todas las estimaciones del modelo cuadrático encontrado se obtienen valores superiores de resistencia que los proyectados, lo cual asevera el efecto positivo del uso del Fibrequén en el material compuesto y a su vez crea una reserva resistente en el material.
- La longitud posee un comportamiento cuadrático con el máximo sobre 1.5" (38 mm).

Al realizar el análisis de las longitudes óptimas para cada dosificación tomamos (32) y
fijando D, de manera que:

$$\left(dR_c / dl\right) = b_2 - b_4 D - 2b_5 l \qquad (33)$$

Cuyo cero es el punto $l = \left[\left(-b_2 - b_4 D\right)/\left(-2b_5\right)\right]$ (34)

sustituyendo en (34) para D = 3 kgF/m^{3}H al ser ésta la dosificación óptima se obtiene que l = 1.7" (46.64 mm), por tanto el punto óptimo del modelo cuadrático obtenido es (3, 1.7, 24.33) que posee características similares de

mejoras de resistencia en el orden del 25 % con intervalos de confianza del 22 al 28 %. Por tanto los resultados experimentales se encuentran dentro del criterio de longitud de l > 2lc estudiado en el Ep. I.3.1, soportando, el compuesto, el aumento de esfuerzos unitarios.

La literatura reporta la existencia de correlaciones entre la resistencia a la compresión y las resistencias a la tracción y a la flexión para los hormigones simples. Buscando dichas correlaciones para el hormigón reforzado con Fibrequén y en los intervalos de longitudes y dosis señalados e igual método matemático, con las resistencias obtenidas de la compresión, la tracción y la flexión se tienen las siguientes curvas y sus ecuaciones.

Visualizadas en los Gráficos No. 2 y No. 3 se obtiene:

Gráfico No. 2

Correlación Rt vs Rc

Hormigón a los 28 días

UM: MPa

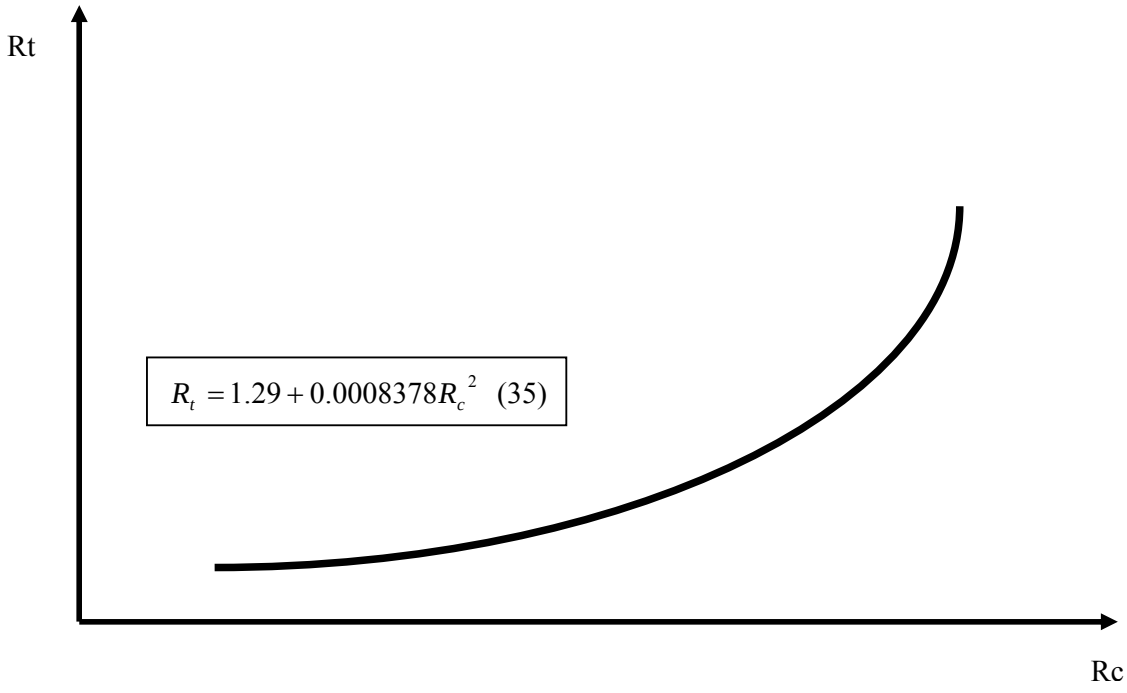
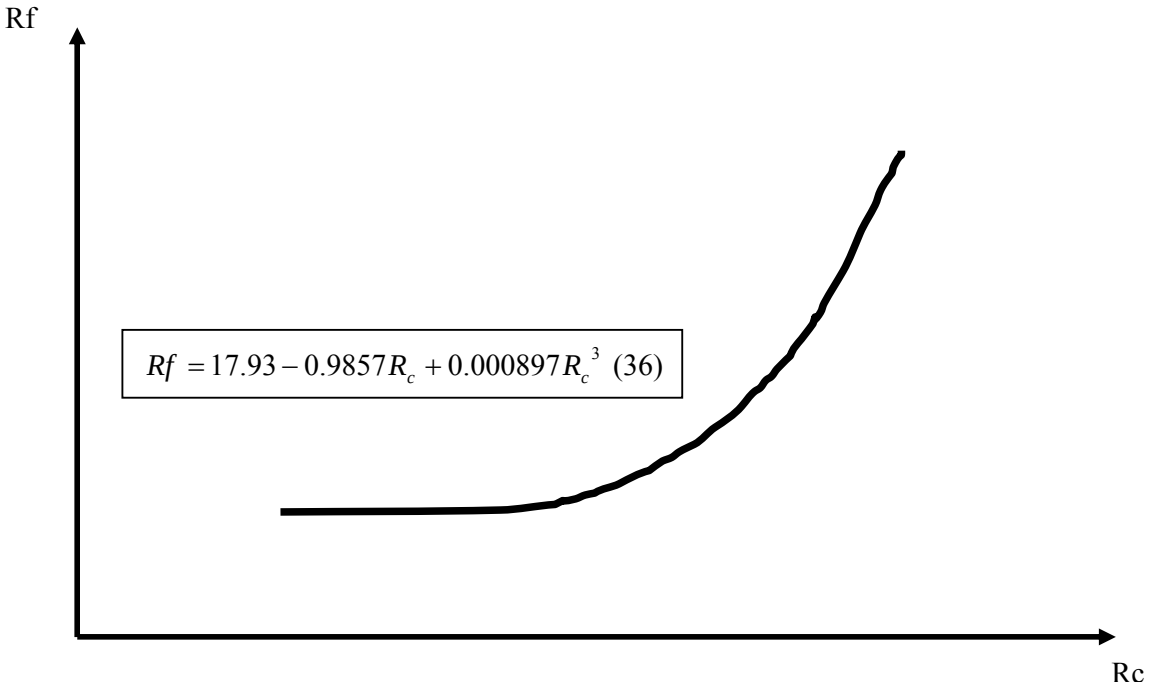


Gráfico No. 3

Correlación Rf vs Rc

Hormigón a los 28 días

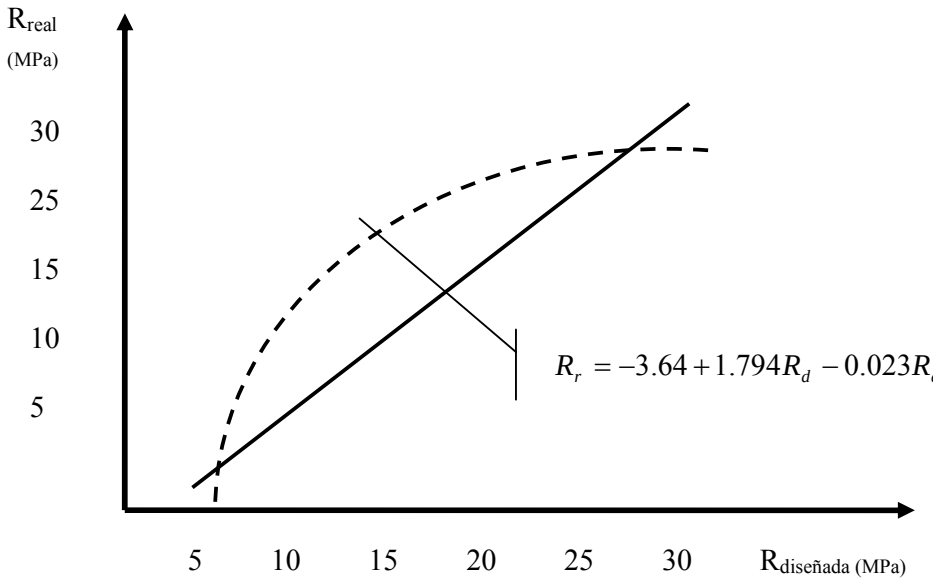
UM: MPa



Como se observa en el Gráfico No. 2 la correlación existente entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción se corresponde con un polinomio de segundo grado (35) cuyo extremo no se encuentra en la región analizada, por tanto coinciden los óptimos en dosificación y longitud.

El caso de la correlación de la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión es una ecuación polinómica de tercer grado (36), pero ningún extremo aparece en la región analizada (ver Gráfico No. 3), lo que implica que hay coincidencia con los óptimos de dosificación y longitud para la compresión y la tracción.

Para verificar la veracidad de los óptimos obtenidos al ser diferente la resistividad de la matriz se variaron las resistencias de los diseños de mezclas proyectadas en 5, 10, 15, 17.5, 20 y 25 MPa con los óptimos de longitud y dosis hallados, obteniéndose:



$$R_r = -3.64 + 1.794R_d - 0.023R_d^2 \quad (37)$$

Del modelo cuadrático se tiene:

	Estimaciones			
	R real			
R diseñada	Intervalo de Confianza			Rr - Rd
5	3.51	4.76	6.00	- 0.24
10	11.23	12.00	12.77	+ 2.00
15	17.28	18.09	18.91	+ 3.09
17.5	19.94	20.71	21.48	+ 3.21
20	22.32	23.04	23.75	+ 3.04
25	25.58	26.83	28.09	+ 1.83

Del cuál se puede plantar:

- El modelo es válido para resistencias medias, apreciándose un efecto positivo de la combinación óptima de Fibrequén en la resistencia real y que se encuentra en el rango de diseños de mezclas que van exactamente de 5.44 a 29.08 MPa.
- La mezcla diseñada que mejores resultados tiene es la de 17.5 MPa, con un incremento resistente de 3.21 MPa, estando el óptimo del modelo en 17.26 MPa.

- Entre diseños de mezclas de 15 a 20 MPa los incrementos resistentes obtenidos son prácticamente constantes y sobre los 3 MPa lo que induce la certeza de la veracidad de la combinación óptima de longitud y dosis de fibra que se obtuvo.

Resumiendo, se ha obtenido:

1ro.- Los modelos matemáticos de las ecuaciones (32), (35) y (36).

2do.- La combinación óptima para resistencias medias es:

Longitud = 38 mm y Dosis = 3 kgF/m3H

3ro.- Para la combinación óptima y resistencia media de 15 MPa se tiene:

a)

Resistencias	% vs Control	% vs Rcf
Compresión	125	-
Tracción Indirecta	85	5.4
Flexión	109	28

b) S = 6.5 mm
Vf = 0.41 %
Se = 0.55 cm^{-1}

V.5 – Estudio de las Propiedades Físico-Químicas y Mecánicas en Función del Tiempo de los Morteros Fibrorreforzados con Fibrequén. Método de Evaluación de la Degradación del Fibrequén a Escala de Laboratorio.

Considerado como válido el efecto simultáneo de las variaciones en longitud y dosis de Fibrequén es necesario conocer cómo es este comportamiento en función del tiempo. Su importancia estriba en la degradación que se produce en las fibras dentro del medio cementicio. La experimentación fue real, o sea, con especimenes de mortero fibrorreforzado a los que se les midió como parámetros dependientes las resistencias a la compresión y a la flexión. Los parámetros independientes analizados fueron:

- Dosificaciones (KgF/m^3 H) : 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3

- Longitudes (pulgadas) : 0.5, 1 y 1.5
- Tiempo (días) : 28, 45, 90, 180 y 270

La determinación de los intervalos está dada en el caso de dosificaciones y longitudes por iguales condicionales que en el epígrafe anterior, sólo que se limita aún mas las longitudes por la razón práctica de que los espesores de mortero son pequeños y debemos tender a la distribución casual, base de las propiedades de los materiales fibrorreforzados. En el caso del tiempo, en función de los reportes de la literatura, consideramos suficiente, para modelar el comportamiento, 270 días de estudio con las particiones señaladas. Se buscó el modelo matemático que describe el comportamiento de la resistencia a compresión en función de las dosificaciones, longitudes y el tiempo a partir de los resultados obtenidos. Utilizamos el método de regresión lineal múltiple con el que se ajustó un modelo cuadrático que responde a:

$$R_c = R_m + b_1 D + b_3 t + b_4 D^2 + b_6 Dt + b_7 l^2 + b_8 lt + b_9 t^2 \qquad (38)$$

donde:

Rc : resistencia a la compresión (MPa)

Rm : resistencia media proyectada (MPa)

D : dosificación (kgF/m^{3}M)

l : longitud (pulgadas)

t : tiempo (días)

y para el caso estudiado se obtuvo que:

Rm = 37.56782, b1 = - 7.309149, b3 = - 0.01086475, b4 = 2.332689,

b6 = 0.005482, b7 = - 3.005050, b8 = 0.03064533 y b9 = 0.0003847

Del análisis del modelo resalta que la longitud del Fibrequén posea una menor importancia relativa de aporte resistente que el brindado por la dosis y el tiempo. Comprobando, lo planteado en la literatura referente a que la longitud de la fibra no posee su mayor influencia en los aumentos de la resistencia. Las longitudes de fibras son verdaderamente importantes al interceptar a las fisuras en su proceso de formación y las mejoras al material que esto entraña.

Haciendo un análisis de las relaciones de dosis, longitudes y tiempos óptimos derivamos

el modelo con respecto a las mismas y lo igualamos a cero, teniéndose entonces que:

$$l = 0.0050989\ t \quad (39)$$

$$D = (7.309149 - 0.005481928\ t\ ) / 4.67378 \quad (40)$$

$$t = (0.01086475 - 0.005481928\ D - 0.03064533\ l\ ) / 0.0007694 \quad (41)$$

De (39) se obtiene:

t (d)	28	45	90	180	270
l (mm)	3.58	5.87	11.75	23.50	35.24

longitudes en las que se producen las máximas degradaciones en función de un momento de tiempo dado y donde se aprecia una correlación directa, la cual es explicada en función de que la agresividad de la matriz cementicia sobre la fibra, dada por el ataque de los iones OH y que rompe la cadena de las células se hace más lenta para longitudes de fibras mayores.

Al analizar (40) vamos a tener:

t (d)	28	45	90	180	270
D (kgF/m^{3}M)	1.56	1.51	1.46	1.35	1.25

dosis a las que se produce las máximas degradaciones en función del tiempo y para los tiempos estudiados se comporta en un entorno sobre los 1.46 kgF/m^{3}M y con diferencias máximas de dosis de sólo 0.21 kgF/m^{3}M, lo cual nos va a ocurrir con tendencia decreciente. Este resultado nos va a inducir a que estas dosis poseen intervalos de fibras que facilitan la acción degradadora, por lo cual no deben utilizarce.

Se ha considerado la dependencia de longitud y dosificación en el tiempo por separado, pero al analizar (41) estamos ante el caso de los tiempos máximos de degradaciones del modelo estudiado y donde se aprecia la interrelación real que poseen los tres factores: tiempo, dosis y longitud. Por tanto al evaluar (41) se llega a:

	D	0.5	1	1.5	2	2.5	3
l = 13 mm.....t	10	13	17	21	24	27	
l = 25 mm.....t	29	33	37	40	44	47	
l = 38 mm.....t	49	52	56	59	64	67	

donde a medida que las longitudes son mayores el momento de la degradación máxima se aleja en el tiempo y a su vez para cada longitud fija el aumento de dosis provoca que la acción degradante de la matriz sea más tardía, o sea, para mayores longitudes y cantidades de fibras la degradación se hace más lenta en términos de tiempo.

Representando gráficamente (38) para longitudes de 13, 25 y 38 mm tenemos que se obtienen los Gráficos No. 4-A, 4-B y 4-C, cuyo análisis es, en función del tiempo:

- Para todas las dosificaciones, en función del tiempo se producen caídas de la resistencia a compresión.
- A mayores volúmenes de fibras la caída resistente es más demorada, lo cual lo explica las propias cantidades mayores de fibras dentro de la matriz cementicia y que son atacadas por la alta alcalinidad de ésta.
- A menores volúmenes de Fibrequén la acción degradante del medio básico sobre las mismas es más completa, obteniéndose los menores valores resistentes.
- La mejor dosificación corresponde a 3 kgF/m^3M con una longitud de 38 mm, al poseer los mayores valores resistentes en función del tiempo.
- Los decrecimientos máximos resistentes para los intervalos de dosificaciones y longitudes analizados se encuentran entre los 28 y los 90 días.

Sobre la base de los criterios de que la combinación de dosis y longitud óptima se corresponde con aquella que posee mejores resultados resistentes, más demora en degradarse y prontas y mayores recuperaciones.

Con los elementos dados anteriormente podemos concluir, que para las condiciones estudiadas la combinación óptima es dosis de 3 kgF/m^3M y longitud de 38 mm y el punto óptimo del modelo matemático sería (3, 1.5, 270, 45.44) con intervalos de confianza del 4.5 %.

Buscando la correlación existente entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión en los intervalos acotados se utiliza la regresión lineal múltiple y se llega al modelo:

$$R_f = b_o + b_1 R_c \qquad (42)$$

el cual se visualiza en el Gráfico No. 5 y donde:

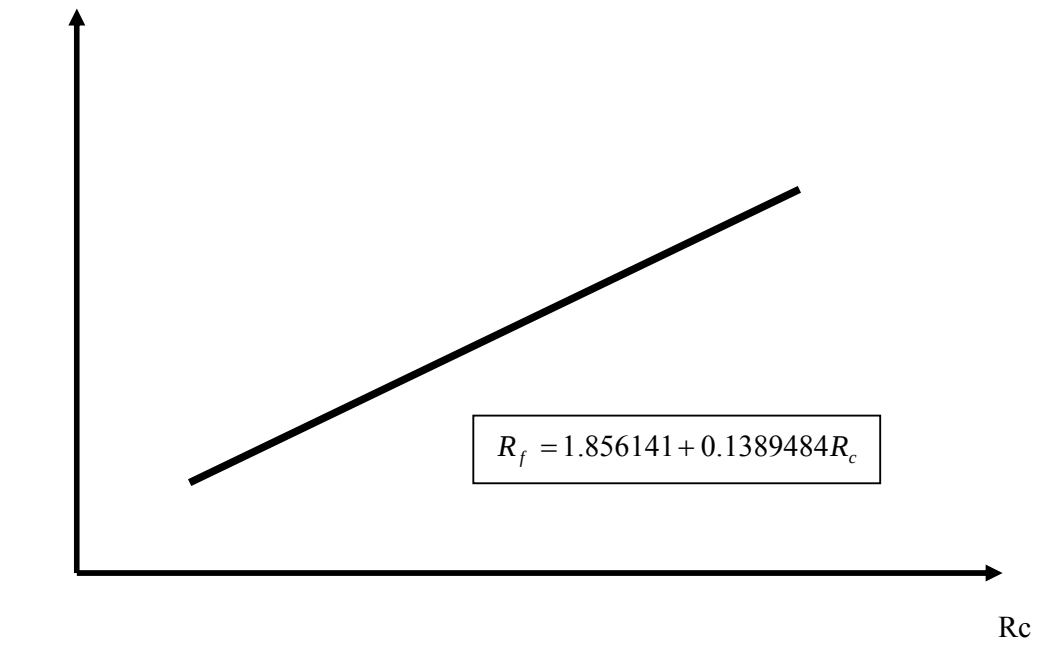
b_o = 1.856141 y b_1 = 0.1389484

Gráfico No. 5

Correlación Rf vs Rf

Morteros en el Tiempo

UM: MPa



Dicha correlación (42) se corresponde con la ecuación de una recta por lo que coinciden los óptimos determinados del análisis de la compresión.

Los resultados de las propiedades físico-mecánicas en función del tiempo de los morteros fibrorreforzados con Fibrequén permiten resumir:

1. Se han obtenido los modelos matemáticos que relacionan las resistencias a compresión y a flexión en función de diferentes combinaciones de dosis, longitudes y tiempos, éstas están dadas por las ecuaciones (38) y (42).
2. La combinación óptima en función de todos los factores analizados es:
    a. -Longitud = 38 mm y Dosis = 3kgF/m^3M cuya eficiencia (S), fracción de volumen (Vf) y superficie específica (Se) ya fueron determinadas anteriormente.
3. Existen caídas de resistencias en función de las degradaciones del Fibrequén que alcanzan sus valores mínimos entre los 28 y los 67 días, pero estos no son bruscos al considerar que dichos resultados están fundamentados por los bajos contenidos de lignina y hemocelulosa del Fibrequén, además de las longitudes y dosis bajas empleadas que hacen en general más resistente al Fibrequén a la acción de los alcalis.
4. Los resultados obtenidos en función de la degradación del Fibrequén en el medio cementicio demuestran que el problema existe, pero no es crítico como se reporta en la literatura, para otras fibras orgánicas. Se reporta por Gram que las fibras de sisal a los 200 días poseen su máxima degradación en el medio cementicio; esta situación no ocurre así con el Fibrequén como refuerzo en matriz cementicia como se ha demostrado. La literatura no reporta análisis de degradación-recuperación de las fibras naturales reforzando hormigones y morteros en el tiempo como se ha comprobado en la investigación, lo cuál es básico para analizar las posibles degradaciones e introducción de resultados en la práctica social. No obstante debe ser atendida la degradación.

A la par de estos estudios a especimenes reales fibrorreforzados se trabajó en buscar una metodología, a escala de laboratorio, que permite, con los medios técnicos disponibles, poder evaluar, antes de su uso efectivo en hormigones, la degradación que llega a alcanzar la fibra analizada, el Fibrequén, y abaratar todo el proceso experimental. Se basa en relacionar la durabilidad del Fibrequén con los cambios morfológicos producidos por disoluciones inorgánicas con diferentes PH que semejaron las condiciones del hormigón y donde las fibras fueran embebidas a diferentes atmósferas y temperaturas. Se realizaron evaluaciones el deterioro de las fibras a diferentes tiempos, basados en microscopía óptica, técnicas IR y detección cualitativa de carbohidratos.

Los resultados básicos de esta etapa están dados por:

1) Se desarrolló una metodología, propia y eficaz, para evaluar la degradación de fibras orgánicas en el tiempo, simulando medios cementicios con la cual no se contaba en el país.

2) Las disoluciones con PH superiores a 13 produjeron los mayores deterioros en las fibras de henequén a los 90 días.

3) La forma predominante de deterioro de la fibra de henequén a los 90 días fue la separación entre las cadenas de células esclerenquimáticas.

4) El amarillamiento de las fibras de henequén aparecerá a los valores de PH superiores a 13 debido a la reacción del medio con la lignina contenida en las fibras.

5) La detección de carbohidratos en las disoluciones que contenían las fibras de henequén est n relacionadas con el deterioro de las mismas.

6) Las variaciones de temperatura y de atmósfera (aire y nitrógeno) no causaron cambios en los parámetros experimentales para las fibras de henequén.

Estos resultados coinciden, con los obtenidos en los Laboratorios de Materiales de Construcción y con los de otras fibras vegetales como son el sisal, yute y coco.

De esta forma se abarcan los dos métodos fundamentales que se emplean mundialmente para analizar las pérdidas de capacidad resistente de las fibras.

V.6 - Análisis de Métodos para Contrarrestar el Debilitamiento.

El conocimiento de los diferentes métodos para contrarrestar el debilitamiento de las fibras de henequén en el medio cementicio llevó a estudiar:

a) Impregnación de las fibras en un agente repelente al agua.

El objetivo es impedir que los poros de agua alcalina lleguen a la fibra, por tanto se evitan las reacciones internas. Se trabajó con un polivinilo formal (PVF) desarrollado en el Dpto. de Polímeros del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Cuba (CENIC). En su estructura presenta grupos formales, hemiformales acetatos e hidróxidos unidos a una cadena carbonatada saturada. Entre sus ventajas están su alta resistencia al intemperismo y a la acción de microorganismos, además de buena plastificación interna, menor costo que similares y tecnología de obtención nacional. Su mayor dificultad estriba en la necesidad de un porciento de solvente importado para la formulación final con el PVF.

b) Impregnación de la fibra con un agente bloqueador.

Al hacer esta impregnación con agentes que puedan reaccionar con ciertos componentes y cuyos resultados sean sustancias difíciles de disolver en un ambiente alcalino debe inhibirse la degradación.

Decidimos seguir la experiencia empírica yucateca de embeber las fibras de henequén en una disolución saturada de cal, aún cuando estos no poseen una evaluación de los resultados obtenidos en función del tiempo, dado lo barato que resulta dicho tratamiento.

Teóricamente la lignina, que posee en su estructura cidos y fenoles, reacciona con el calcio contenido en la cal, o sea, se provoca la hidrólisis ácida de estas sustancias presentes en la lignina y se forman sales insolubles que actúan como agentes bloqueadores al llegar la fibra al medio cementicio.

Se realizó la experimentación para morteros reforzados con Fibrequén impregnado en PVF y con cal, individualmente y hasta tiempos de 360 días,

buscándose el modelo matemático que simultaneara los efectos del mortero reforzado con Fibrequén en tres niveles: sin tratamiento, impregnado con PVF e impregnado con cal, de manera que se describiera el comportamiento de la resistencia a compresión en función de dosis, longitudes, tiempo y tratamiento. El tratamiento se trabajó con dos variables ficticias que se le asignaron valores de:

Morteros + Fibrequén (M + F)	X4	X5
PVF	1	0
Cal	0	1
Sin Tratamiento (S/T)	- 1	- 1

y utilizando el método de regresión lineal múltiple se obtuvo el modelo cuadrático. Dada la complejidad del modelo su análisis efectivo está dado por los términos vinculados a los tratamientos y los gráficos obtenidos para la longitud óptima de 38 mm.

a) Análisis de los términos vinculados al tratamiento.

M + F	X4	X5	Término
PVF	1	0	$b_9 D + b_{18}$
Cal	0	1	$b_{18} D + b_{17} t$
S/T	- 1	- 1	$-(b_9 + b_{10})D - b_{17} + b_{18}$

En cada caso tenemos:

- PVF : .La resistencia a compresión disminuye con el aumento de las dosis.
  .El tiempo no es determinante en los entornos analizados.
- Cal : .Existe un efecto negativo respecto a la resistencia a la compresión dado el aumento de dosis con el tiempo.
- S/T : .Existe un balance entre dosificación y longitud que contribuye a aumentar la resistencia a la compresión, teniendo mayor peso porcentual las dosis.

Del Gráfico No. 6 : Morteros con Fibrequén y PVF tenemos:

- A mayores densidades de fibras disminuye la resistencia a la compresión.

- Se producen las caídas de la resistencia a compresión a partir de los 270 días.
- La caída de la resistencia a compresión es poco significativa en el entorno estudiado.
- Resultados resistentes bajos en general.

Mundialmente los tratamientos con agentes repelentes al agua han sido dados con resinas epóxicas y de poliésteres, y productos bituminosos fundamentalmente. Al igual que en el caso del PVF estudiado el proceso de debilitamiento se traslada en el tiempo pero no puede ser evitado.

Al analizar el Gráfico No. 7 : Morteros con Fibrequén y Cal se tiene que:

- La caída de las resistencias a la compresión ocurren entre 180 y 270 días.
- A edades tempranas a mayores dosis mayores caídas en los resultados a la compresión.
- La recuperación es rápida a los 360 días.
- Resultados resistentes bajos en general.

En este tipo de tratamiento se busca como resultado sustancias difíciles de disolver en un ambiente alcalino, y los agentes bloqueadores planteados están en las líneas de los silicatos de sodio, sulfatos de magnesio, hierros, sales de barium y antioxidantes. Los resultados en fibras de sisal no han sido satisfactorios. En cuanto a lo obtenido con la impregnación del sisal con formina y nitrato de barium han tenido un efecto favorable tendiente a retardar el efecto de debilitamiento. Con el anterior tratamiento en cuatro años las fibras de sisal aún poseían su capacidad resistente dentro de la matriz cementicia, pero son antieconómicos, tanto desde el punto de vista del costo de los productos como del proceso tecnológico de impregnación, lo que ha provocado que no se empleen.

Del Gráfico No. 8 : Morteros con Fibrequén, se realiza el siguiente análisis:

- Dado el efecto del comportamiento simultáneo de los valores resistentes de los morteros fibrorreforzados y tratados con PVF y con cal no se aprecia el efecto degradante como en el análisis realizado anteriormente.
- Los resultados resistentes son mejores al compararlos con los gráficos No. 6 y No.7.
- Los resultados óptimos continúan estando para dosificaciones de3 kgF/m^3M.

Del resultado de los métodos empleados para contrarrestar el debilitamiento del

Fibrequén concluimos:

1ro.- Impregnación de las fibras en PVF.

.La resistencia disminuye con la presencia de las fibras tratadas, lo cual se encuentra a mayores dosis. Este efecto se considera debido a que el PVF provoca disminución de la adherencia fibra-matriz.

.El PVF como agente impregnante, provoca que se retarde la acción degradadora de la matriz cementicia sobre la fibra, pero no la inhibe, desplazándose el comienzo del bloque de degradaciones a los 270 días desde 45 cuando no existe protección.

2do.- Impregnación de las fibras con cal.

.Se retarda el bloque de degradaciones desde 45 a 180 días a 180 a 270 días, entorno muy cercano y poco efectivo.

.Las resistencias en general decaen respecto a las fibras no tratadas, aún cuando las recuperaciones son rápidas a los 360 días.

3ro.- Los métodos empleados no son efectivos, no recomendando su empleo, existiendo concordancia entre estos resultados y los obtenidos mundialmente, al no ser éste un problema resuelto, necesario de investigaciones más profundas y en el caso de Cuba con sustancias autóctonas de fácil obtención.

- Conclusiones referidas a los temas de investigación.

De los resultados investigativos obtenidos podemos concluir:

1) Es válido reforzar hormigones y morteros con Fibrequén.
2) Se obtuvieron los modelos matemáticos como polinomios cuadráticos, ya que la zona escogida de análisis contiene al punto máximo global, lo que implica que no se trabajaran con valores extremos locales en el diseño, lo cual asevera que los intervalos elegidos fueron correctos para determinar las resistencias a la compresión, la flexión y la tracción en hormigones y la compresión y la flexión para los morteros y en los entornos señalados. A partir de la obtención de los modelos matemáticos la combinación óptima obtenida para hormigones y morteros es:
   - Dosificación : 3 kgF/m^3
   - Longitud : 38 mm

   a la que le corresponde una eficiencia S de 6.5 mm, una fracción de volumen Vf de 0.41 %, una superficie específica Se de 0.55 cm^{-1} y donde hay presentes un total de 1 523 750 fibras.
3) El usar hormigones fibrorreforzados con Fibrequén sin protección provoca caídas resistentes máximas entre los 28 y los 67 días dadas las degradaciones de las fibras en el medio cementicio.
4) El análisis de los métodos de impregnación considerados demuestran que no son efectivos y no se recomienda su empleo.

CAPÍTULO VI: EMPLEO DEL FIBREQUÉN.

Los resultados expuestos están basados en la experimentación y la introducción de los resultados en la práctica social durante quince años.

VI.1 - Recomendaciones para el Empleo del Fibrequén en Hormigones y Morteros.

El empleo de hormigones y morteros fibrorreforzados con Fibrequén y en función de las propiedades como refuerzo no estructural del material compuesto, debe estar subdividido en las operaciones siguientes:

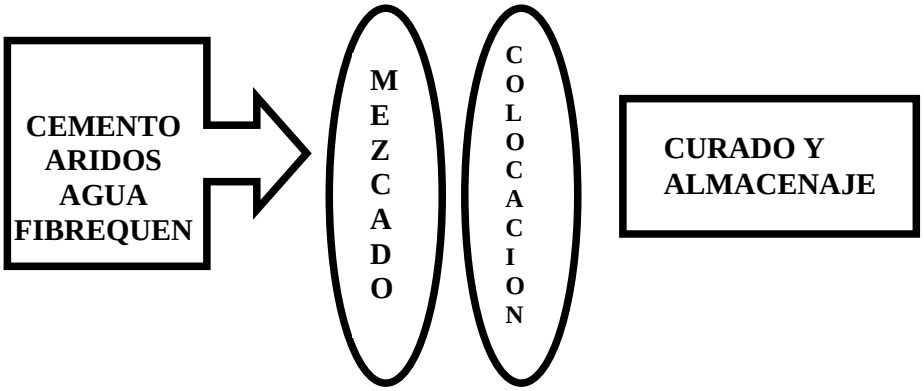
a) Preparación de los materiales constituyentes.

b) Mezclado.

c) Colocación.

d) Curado y almacenaje.

Graficando el proceso constructivo se tiene:



La descripción del proceso es:

a) Preparación de los materiales constituyentes.

Los materiales constituyentes deben cumplir con las siguientes características:

- Cemento. El recomendado para ser usado es el Tipo I (Uso General) de la ASTM y que cumpla las especificaciones estándar C-150 o C-595 de la ASTM, aunque otros tipos, en dependencia del uso específico, pueden ser empleados. Cementos con altos por cientos de puzolana tienden a bajar el contenido de hidróxido de calcio libre en el hormigón disminuyendo la alcalinidad, lo cual es satisfactorio para disminuir el efecto degradante en las fibras naturales con el tiempo dada la presencia de sustancias degradables.
- Áridos. Deben cumplir los requerimientos especificados en la ASTM-C-33.
- Agua. El agua debe ser limpia, sin sales disueltas, libre de impurezas y de materias en suspensión.
- Fibrequén. Emplear las siguientes combinaciones en función del objetivo final a lograr:

1- Para mejorar las propiedades tensomecánicas del producto final, Dosis = 3 kgF/m^3H y Longitud = 38 mm, combinación que es la óptima.

2- Para evitar la fisuración del producto final, sin mejoras en las propiedades tensomecánicas como factor primordial, y con las ventajas propias del material fibrorreforzado, emplear combinaciones no óptimas y ahorrando la fibra con Dosis = 1 KgF/m^3H y Longitud = 20-38 mm. De manera general, dentro del proceso constructivo, se recomienda que el Fibrequén posea longitudes sobre la tercera parte del espesor del elemento final. De esta manera se garantiza la distribución casual, base de las propiedades del material fibrorreforzado, pero no es invalidante esta condicional para lograr espesores delgados donde la orientación bidimensional de las fibras es suficiente en función de los objetivos que se persiguen.

b) El Fibrequén, una vez cortado y pesado para garantizar la combinación de dosis y longitud escogida, se vierte directamente a la hormigonera en la obra, en el camión hormigonera, en la planta o al proceso de mezcla manual junto al resto de los materiales, siendo necesaria la presencia de los áridos para su correcta distribución dentro de la matriz que se está conformando. Es necesario que las fibras se mezclen progresivamente, lo más lento posible, dispersas y nunca junto al agua y el cemento solamente. El procedimiento a seguir se resume en mezclar el cemento con el agua hasta formar la pasta, luego añadir los agregados finos, el Fibrequén, el resto del agua, los agregados gruesos (en caso de estar elaborando hormigones) y los aditivos, por último, de llevarlos la mezcla. El tiempo de mezclado de todos los componentes no debe ser inferior a 3 minutos. El procedimiento de mezclado debe ser complementado a partir de la ASTM C-94 y las recomendaciones de la ACI - 304.

c) Colocación.

El Fibrequén provee al material compuesto de una buena plasticidad en estado fresco, lo cual posibilita la adecuada colocación e incluso acondicionarlo a diferentes formas antes de endurecerse. El uso de fibras condiciona que el producto fresco sea laborable y su colocación se facilita de emplearse correctamente la vibración, la cual debe ser de alta frecuencia y pequeñas longitudes. Las terminaciones, de ser posible, deben ser dadas

con elementos metálicos para evitar que se descubran las fibras, y no debe ser rota la distribución casual del Fibrequén dentro del compuesto por la introducción de elementos metálicos en el mismo.

d) Curado y Almacenaje. Los productos fibrorreforzados deben poseer un curado adecuado para evitar la evaporación del agua necesaria para la hidratación del cemento y de esta forma garantizar que no existan fisuras y se alcance la resistencia proyectada. El desmolde de los elementos fibrorreforzados con Fibrequén debe efectuarse a las 24 hora de haber fundido, en el caso de usar aceleradores de fraguado dicho tiempo puede disminuirse. El tiempo de curado requerido depende del tipo de cemento empleado, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento como parámetros fundamentales y es función directa del elemento que se está construyendo. Se recomienda para elementos prefabricados y básicamente los que responden a una estructura laminar, el siguiente ciclo:

Curado por Riego de Agua Intensivo en el Molde	Curado por Inmersión en Agua	Curado por Riego de Agua 3 Veces al Día
24 h	24 h	5 días

En el caso de hormigones y morteros fibrorreforzados fundidos in situ el curado debe ser por tapado con mantas húmedas y en su defecto por riego de agua intensivo y siempre, al menos, por 7 días.

El almacenaje debe ser realizado mediante manejo manual, con sumo cuidado y no transportarse hasta que tengan la resistencia adecuada, nunca antes de los 14 días de confeccionado el elemento.

El control de la calidad va a estar presente en todo el proceso productivo, desde la selección de los materiales adecuados hasta la conformación de un producto final acorde a lo proyectado.

Deben ser controlados los aspectos siguientes:

1.- Calidad de los materiales seleccionados.

2.- Adecuada dosificación.

3.- Correcto mezclado, en orden de inclusión de los materiales y tiempo del mismo.

4.- Adecuada colocación y vibrado.

5.- Correcto curado y almacenaje.

6.- Calidad del producto final como un todo y en función de los parámetros diseñados.

Los ensayos recomendados a realizar son:

- Consistencia.
- Abrasión.
- Absorción.
- Permeabilidad.
- Fisuración.
- Resistencias a compresión, flexión y tracción indirecta en el caso de los hormigones.
- Resistencias a compresión y flexión en el caso de los morteros. El muestreo debe estar acorde a las especificaciones C-172 y C-685 de la ASTM.

El empleo de hormigones y morteros con Fibrequén no implica el descuidar ninguna de las prácticas necesarias en el proceso constructivo de su fabricación, colocación, terminación y control de la calidad; pero a su vez no se requieren de otras adicionales.

Dados los resultados obtenidos el campo de aplicaciones del Fibrequén es:

- Secciones finas.
- Pisos.
- Sistemas de impermeabilización.
- Unidades ornamentales.
- Morteros.
- Resanos.

- Pavimentos.
- Elementos de cubierta.

Nunca debe utilizarse el Fibrequén como sustituto del acero estructural. En el caso de elementos repetitivos, como método constructivo adecuado, el elemento fibrorreforzado que se diseñe, debe ser ensayado y certificada su calidad, antes de ser introducido en la práctica social.

VI.2 - Reportes de Aplicación.

En la búsqueda de recursos renovables propios que limiten las importaciones, produzcan ahorros y que a su vez den valores satisfactorios entre las propiedades mecánicas obtenidas y el costo de fabricación, es que consideramos el empleo del Fibrequén en el sector de la construcción en el país.

Las primeras aplicaciones datan de 1988 en Matanzas y se han ido diversificando y extendiendo a todo el país, dentro de todo un proceso de introducción de resultados.

Las aplicaciones fundamentales han sido:

- Pisos de Terrazo Integral.

Objetivo:

Sustituir la malla eslabonada o la cuantía de acero por Fibrequén para tomar las tensiones que provocan la fisuración del hormigón de la sub-base.

Características	Ventajas Fundamentales
.Hormigón con Fibrequén	.Sustitución de importaciones.
.R´bk: 15 Mpa.	.Ahorro de recursos materiales,
.Sub-base de 3 cm.	humanos y de tiempo.
.Dosis: 1 kgF/m^3M	.Elimina la fisuración.
.Longitud: 25 mm	.Posibilitó la ejecución.
.Humaniza el trabajo	

- Fecha de Introducción: 1988
- Entidades Introductoras: MICONS, UNECA

- Losas de Cabinas Sanitarias

Objetivo:

Disminuir el espesor de las losas de techo de las cabinas sanitarias de 5 cm de hormigón armado con el fin de trabajar adecuadamente las instalaciones hidrosanitarias entre el entrepiso y las losas del Hotel Paradiso.

Características	Ventajas Fundamentales
.Total de losas: 255	.Sustitución de importaciones
.Mortero 1:4 con Fibrequén	.Ahorro de recursos materiales,
.Espesor: 3 cm.	humanos y de tiempo.
.Dosis: 1KgF/m^3M	.Elimina la fisuración.
.Longitud: 25 mm	.Posibilitó la ejecución
	.Humanizó el trabajo.

- Fecha de Introducción: 1988
- Entidad Introductora: UNECA

- Conformando Limas en Cubiertas Planas

Objetivo:

Sustituir mortero con malla eslabonada de solución tradicional para poder conformar las limas y existan las pendientes necesarias para asegurar el correcto drenaje en Fábrica de Sorbetos de Jovellanos.

Características	Ventajas Fundamentales
.Mortero 1:4 con Fibrequén	.Sustitución de importaciones
.Capa de 2 cm	.Ahorro de recursos materiales,
.Total de limas: 32	humanos y de tiempo.
.Area cubierta: 1922 m2	
.Dosis: 1.5 KgF/m^3M	
.Longitud: 19 mm	

- Fecha de Introducción: 1988
- Entidad Introductora: MICONS

- Nueva Protección a Lamisfal con Altas Pendientes.

Objetivo:

Sustituir el lamisfal alú como solución de impermeabilización en pendientes mayores del 8 % por lamisfal estándar al contarse con la protección adecuada.

Características	Ventajas Fundamentales
.Mortero 1:3 con Fibrequén	.Sustitución de importaciones
.Capa de 2 cm	.Ahorro de recursos materiales
.Dosis: 1 kgF/m^3M	
.Longitud: l9 mm	

- Fecha de Introducción: 1989
- Entidad Introductora: MICONS

- Nueva Protección al Asfalto Varadero

Objetivo:

Sustituir la soladura indicada por proyecto como protección del Asfalto Varadero en el sistema de impermeabilización del Hospital Clínico Quirúrgico de Matanzas por mortero con Fibrequén.

Características	Ventajas Fundamentales
.Mortero 1:3 con Fibrequén	.Ahorro de recursos materiales,
.Capa de 2 cm	humanos y de tiempo.
.Area cubierta: 8744 m2	
.Dosis: 1 kgF/m3M	
.Longitud: 25 mm	

- Fecha de Introducción: 1990
- Entidad Introductora: MICONS

- Elementos para Canteros de Agropónicos

Objetivo:

Producir un elemento de poco peso, manuable, económico y capaz de uniformar los diferentes materiales de construcción que se emplean en la conformación de canteros tecnificados para agropónicos.

Características	Ventajas Fundamentales
.Hormigón con Fibrequén	.Elemento uniformador para canteros
.R'bk = 15 MPa	.Ahorro de recursos materiales
.Peso: 35 kg	.Económico, manuable, resistente e
.55 u/m^3H	impermeable
.Dosis: 1.5 kgF/m3H	
.Longitud: 25 mm	

- Fecha de Introducción: 1990
- Entidades Introductoras: MINAGRI, MINED, MINFAR, MICONS, Poder Popular

- Elementos de Canteros de Zeopónico

Objetivo:

Racionalizar el proyecto ejecutivo del Zeopónico para el turismo de Cárdenas con sistema constructivo prefabricado, de hormigón armado para conformar los canteros y sustituirlos por canteros de hormigón fibrorreforzado con Fibrequén.

Características	Ventajas Fundamentales
.Hormigón con Fibrequén	.Ahorro de recursos materiales,
.R'bk: 17.5 MPa	humanos y de tiempo.
.Peso: 102 kg	.Elemento manuable, económico,
.22 u/m3H	resistente e impermeable
.Total de unidades: 16	.Elimina la fisuración.
.Canteros/unidad: 144 u	
.Long. Cantero: 60 m	
.Dosis: 1 kgF/m^3H	

.Longitud: 25 mm

- Fecha de Introducción: 1990
- Entidades Introductoras: MINAGRI, UNECA, MICONS

- Estanques para la Cría de Algas

Objetivo:

Considerar en el proyecto de estanques para la cría de algas Spirulina Plantesis los fondos de hormigón fibrorreforzado con Fibrequén originalmente de hormigón armado.

Características	Ventajas Fundamentales
.Hormigón con Fibrequén	.Ahorro de recursos materiales,
.R'bk: 17.5 MPa	humanos y de tiempo
.Dosis: 1 kgF/m^3H	. Elimina la fisuración
.Longitud: 25 mm	

- Fecha de Introducción: 1992
- Entidades Introductoras: MICONS, UNECA, MINAGRI

- Sistema de Paneles Aligerados

Objetivo:

Paneles de hormigón con Fibrequén a emplearse como facilidades temporales y viviendas de bajo costo.

Características	Ventajas Fundamentales
.Hormigón con Fibrequén	.Desmontables
.R'bk: 17.5 MPa	.Poco peso relativo
.Paneles nervados, lisos	.Poco volumen de materiales
o con fenestración	.Mayor durabilidad que los de madera
	.Bajo costo de mantenimiento
	.Fácil elaboración
	.Producción industrializable

- Fecha de Introducción: 1992
- Entidad Introductora: MICONS

- Elementos de Cubierta

Objetivo:

Se han logrado ejecutar tres soluciones de cubiertas que responden al objetivo del proveer al país de nuevas soluciones de cubiertas ligeras para su fabricación y empleo local.

Sección	Dimensiones	Peso (kg)
	(400x500)x1000x30	28
	700x1250x10	25
	540x1830x9	29

Características	Ventajas Fundamentales
.Mortero con Fibrequén	.Construcción local
.Dosis: 1 - 1.5 kgF/m3M	.Económicas, manuables y
.Longitud: 19 mm	resistentes
.Fácil elaboración	

- Fecha de Introducción: 1992
- Entidades Introductoras: MINAGRI, MINFAR, UNECA

Otras soluciones han sido dadas a hormigones y morteros con Fibrequén, todas ellas en función de resolver las necesidades que se presentan en los procesos constructivos. Entre las mismas se encuentran señales de tránsito para el MININT, conformación de superficies curvas de balcones interiores del Hotel Meliá Varadero por la UNECA, tablillas de ventanas por entidades varias, elementos ornamentales por la UNECA, sustituyendo vanos a cubrir por cristales en viviendas por el MICONS, etc.

Dentro de las soluciones de mayor universalidad se encuentra el sistema de cubiertas y entrepisos ligeros para viviendas y restauraciones, desarrollados desde el año 1993 y de amplio uso. Por su importancia le dedicaremos el siguiente epígrafe a su estudio.

VI. 3 - Solución de Cubiertas y Entrepisos para Viviendas de Bajo Costo con Viguetas y Losas de Fibrequén.

El analizar un devenir histórico evolutivo conceptual del desarrollo de la vivienda, nos llevaría sin lugar a dudas, a hacer un compendio de lo acaecido desde que el hombre, llamado primitivo por nosotros, se irguió, se tomó el trabajo como medio de vida y comprendió que debía guarecerse. Desde entonces, cada día, el resolver el techo donde vivir, se vuelve un reto: ¿Qué hacer para resolver la vivienda?, máxime cuando se trata de la vivienda de las mayorías.

En primer lugar está el que todo material y tipología constructiva son válidos, desde las últimas novedades de bloques de polímeros, hasta el bohío cubano. A su vez, de esa mirada a nuestro alrededor, sacamos la segunda experiencia y es que se hace necesario que toda la gama alternativa de viviendas debe subsistir, en franca armonía entre el campo y la ciudad, entre ciudad y campo. En fin, estamos en la búsqueda de un confort de vida adecuado para el ser humano, estamos en la búsqueda del patrimonio tangible del que el hombre se siente más dueño, donde crece la célula fundamental de la sociedad, la familia y es el lugar que se torna en hogar.

Al construir viviendas para la mayoría el programa se vuelve totalmente masivo y por tanto no es posible enfrentarlo con materiales y técnicas constructivas que sean costosas; hay que ir a diferentes opciones que lleven en sí mismas los bajos costos y estos son ciertos cuando logramos observar algunos principios:

1. Los altos costos de la vivienda están dados, básicamente por el uso de materiales de construcción con altos consumos de portadores energéticos, por tanto hay que desarrollar materiales de construcción alternativos donde el empleo de portadores energéticos sea mínimo.

2. El programa de construcción de viviendas de bajo costo preserva un carácter territorial, especialmente en su enfoque técnico, de manera que las tecnologías y soluciones constructivas a utilizar sean con arreglo a los materiales disponibles en el territorio y la base técnico material existente en el mismo.

3. Existe suficiente información técnica, la cuestión es el enfoque y asimilación del problema, tener voluntad y accionar en consecuencia, hay que concientizar el bajo costo y su imprescindible necesidad.

4. Concretar las experiencias prácticas positivas que estén a nuestro alcance y generalizarlas.

Observando los anteriores principios, es posible modelar entonces un programa que abarque las principales directivas para la construcción de viviendas y urbanizaciones de bajo costo. A nuestro modo de ver dichas directivas deben ser encaminadas a tres campos fundamentales y que son el diseño, la ejecución y la producción de materiales alternativos.

En Matanzas, y dados los estudios científicos-técnicos realizados para usar fibras de henequén a una longitudes y dosis optimizadas (Fibrequén), para mejorar la calidad de hormigones y morteros a partir de poseer propiedades tensomecánicas satisfactorias y tender a ser un material de mayor homogeneidad, se diseño todo un programa, en ejecución desde 1993 y que contempló los parámetros de diseño, experimentación, introducción tecnológica y generalización para dar respuesta al problema más acuciante que se presentaba: la solución de cubiertas y entrepisos para las viviendas de bajo costo.

El Fibrequén constituye un recurso renovable y a la vez nos da en su combinación con hormigones y morteros un balance satisfactorio entre las propiedades mecánicas obtenidas y el costo de fabricación. El poseer

identificado a plenitud el material a emplear nos permitió ir entonces a fijar y lograr cumplir con otros parámetros básicos:

- Referente al diseño se realizó un catálogo y sus proyectos como soporte, con 30 soluciones constructivas con criterios de progresividad, de una y dos plantas, y donde se emplea el sistema de viguetas y losas con Fibrequén.

- Emplear, la menor cuantía de elementos estructurales que trabajen a flexión; eliminando todo el refuerzo de acero de las losas convirtiéndolas en fibrorreforzadas.

- Realizar todo el sistema de cubiertas y entrepisos simplemente apoyado, de manera tal de eliminar insertos y agarres de uniones que no fueran los propios de la resistencia a fricción entre elementos de hormigón.

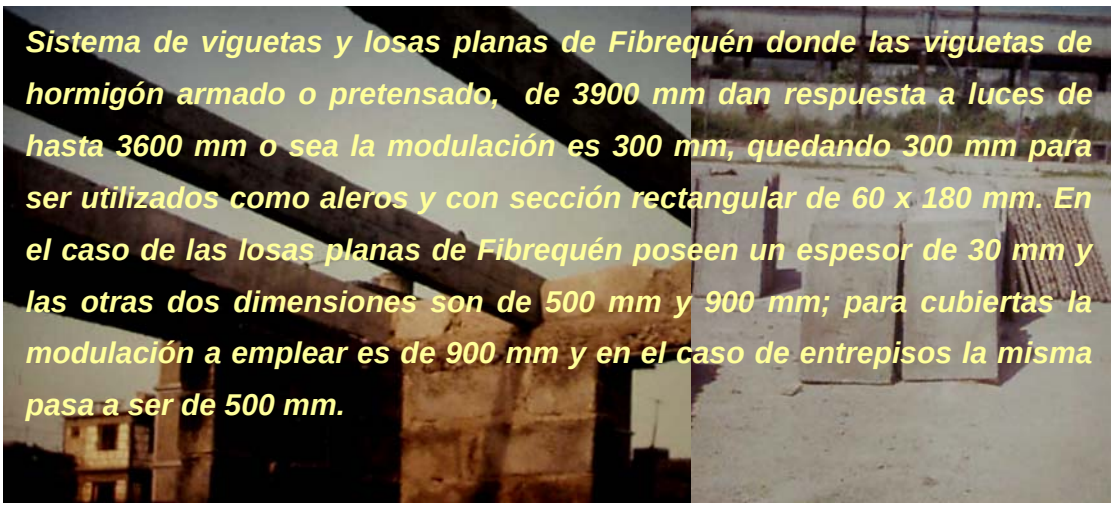
- Lograr la menor cantidad de elementos en el sistema, y que estos, por su peso, no requirieran de medios de izaje, por tanto fueran manuables.

- Aprovechar al máximo las posibilidades del material, de manera tal que la longitud de las losas fuera máxima.

- Lograr un sistema constructivo suficientemente flexible que permita su realización igualmente en lugares especializados como pudieran ser las plantas de prefabricado como a pie de obra.

- Evacuación de las aguas pluviales mediante cubiertas con caídas libres.

La solución constructiva de cubiertas y entrepisos a que se arribó fue la siguiente y que cumplimenta los parámetros básicos preestablecidos, adaptándose a cualquier solución de elemento de pared que se emplee:



Sistema de viguetas y losas planas de Fibrequén donde las viguetas de hormigón armado o pretensado, de 3900 mm dan respuesta a luces de hasta 3600 mm o sea la modulación es 300 mm, quedando 300 mm para ser utilizados como aleros y con sección rectangular de 60 x 180 mm. En el caso de las losas planas de Fibrequén poseen un espesor de 30 mm y las otras dos dimensiones son de 500 mm y 900 mm; para cubiertas la modulación a emplear es de 900 mm y en el caso de entrepisos la misma pasa a ser de 500 mm.

Lo cual podemos visualizar a través del proceso constructivo:

Finalmente para dar la terminación adecuada a la cubierta se ejecuta una carpeta de mortero fibrorreforzado con Fibrequén de 30 mm que cierra estructuralmente la misma.

La distribución eléctrica para la iluminación puede realizarse a través de la carpeta de mortero y la salida a la habitación correspondiente se logra al ubicar en el centro de la losa de Fibrequén la reservación al hacer la fundición. La

solución de impermeable a emplear para el caso de las cubiertas puede ser cualquiera de las generalizadas.

La forma de producción puede ser en planta de prefabricación o directamente a pie de obra, ya sea por brigadas especializadas o directamente por auto esfuerzo. En el caso de Matanzas y a través del MICONS se prepararon las condicionales tecnológicas para en las plantas de prefabricado del sistema de viviendas Gran Panel producir las viguetas y losas planas de Fibrequén como parte de sus líneas de producción. Se instaló una capacidad de 180 cubiertas promedios mensuales considerando una vivienda promedio de 60 m^2.

En el año 1999, ha sido publicado por el Ing Roberto Soto Laserna, de la Dirección de Proyectos del MICONS el título "Análisis Comparativo de las Diferentes Soluciones de Cubiertas y Entrepisos Utilizadas en la Construcción de Viviendas" donde se realiza un análisis comparativo de las diferentes soluciones constructivas y de entrepisos utilizadas en la construcción de viviendas en Cuba, determinando los índices de consumo y menores índices de consumo de acero y cemento. Se analizaron 39 soluciones de cubiertas y 20 de entrepisos.

Por considerar la seriedad técnica del trabajo, su actualidad e integralidad y sobre todo el que es comparativo tomaremos para el análisis de los índices técnicos económicos el mismo, pues en este están consideradas las soluciones planteadas.

INDICADORES FUNDAMENTALES

CUBIERTAS Y ENTREPISOS CON VIGUETAS Y LOSAS PLANAS CON FIBREQUEN

Cemento	Acero	Costo
kg	Kg/m^2	kg/m^2
	ENTREPISOS	
	Solución con viguetas pretensadas	
38.9	3.387	3.92
	Solución con viguetas de hormigón armado	
	35.3	7.33
	CUBIERTAS	
	Solución con viguetas pretensadas	
36.4	3.04	4.47
	Solución con viguetas de hormigón armado	
34.4	5.54	3.60

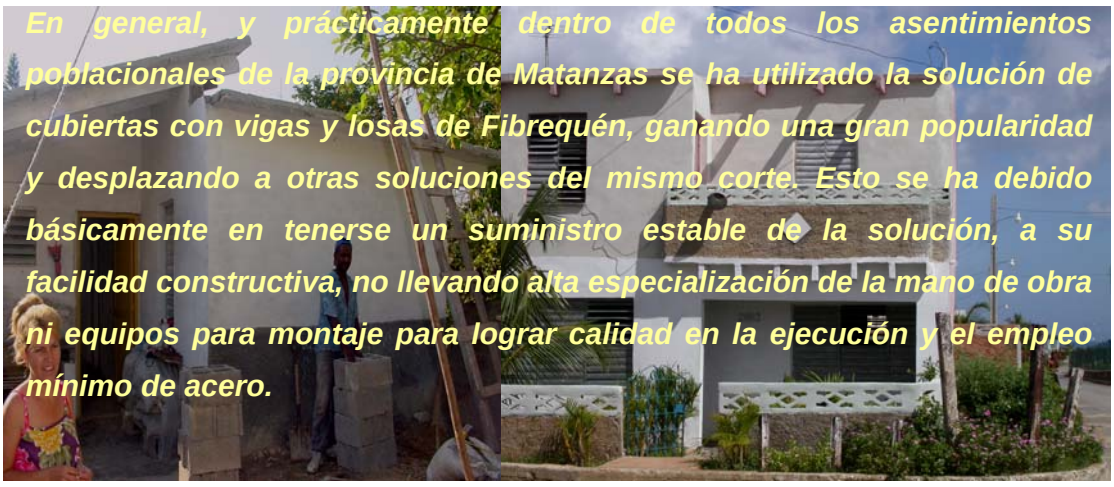
De los indicadores técnicos-económicos analizados resalta:

- ✓ Los indicadores obtenidos son bajos y muy favorables.
- ✓ De todas las soluciones de entrepiso analizadas las dos soluciones brindadas en el presente trabajo (diferenciadas por el tipo de viguetas) están entre las tres mejores del país en el caso del cemento y referente al acero están entre las mejores cinco del país.
- ✓ Referido al costo en MLC como elemento integrador, la mejor solución del país es la de viguetas pretensadas con losas de Fibrequén y cuando se utiliza la vigueta de hormigón armado la solución ocupa el cuarto lugar pero casi a la par de las soluciones que ocupan el segundo y tercer lugar.

- ✓ Para el caso de cubiertas las dos soluciones brindadas están entre las ocho primeras referidas al menor consumo de cemento y es la de menor consumo de acero del país la que usa la vigueta presentada.
- ✓ En cuanto al costo en MLC la solución de losa con Fibrequén y vigueta pretensada es la mejor solución del país y cuando se emplea la vigueta de hormigón armado ocupa el tercer lugar, muy de cerca del segundo.

La generalización del trabajo data de 1993 en la provincia de Matanzas y conocemos de aplicaciones en las provincias de Pinar del Río, Habana, Villa Clara y Camagüey, así como en Venezuela y República Dominicana.

Debemos resaltar que hemos realizado los análisis correspondientes para la introducción a nivel nacional y los mismos nos arrojan que esto es perfectamente factible, partiendo de que la producción henequenera tiene lugar en el Mariel, Juragua y Matanzas lo cual cubre toda la región occidental del país y a su vez que el embalaje del henequén es en pacas de 250 kg. de peso y las dosis empleadas son mínimas para armar los hormigones y morteros (máximo de 3 kg por metro cúbico) lo que hacen que con transportaciones mínimas (por vía terrestre o ferrocarril) se puede llevar de una única vez toda la materia prima necesaria para un amplio plan constructivo.



Las encuestas realizadas para verificar la aceptación de la población de la solución dada han marcado una alta coincidencia en catalogarla como muy

buena y acorde a las posibilidades económicas. A su vez dichos comprobaciones han arrojado la no ocurrencia de filtraciones y el gran ingenio popular al aplicar texturas y pinturas diferenciadas para obtener resultados diferentes. En ningún caso se han ejecutado y se plantea como no necesario el empleo de falsos techos para ocultar las vigas. El factor psicológico del cubano de querer vivir en una vivienda con cubierta pesada a pesar de ser una solución de bajo consumo material también se ha satisfecho y se señala con regularidad por la población como un elemento de seguridad y empatía con el sistema al que han tenido acceso.

En los primeros cinco años de introducción (1993 a 1998) en Matanzas se ejecutaron un total de 4 577 viviendas con la solución de vigas y losas de Fibrequén, de estas 3487 nuevas, 560 por auto esfuerzo de la población y 530 como rehabilitación de techos, previéndose un crecimiento anual de 800 viviendas. Además se han rehabilitado las cubiertas de 76 ciudadelas en el período indicado. La ocurrencia de fenómenos naturales como el Huracán Michelle, de gran intensidad en el 2001, y que han desvastado un alto por ciento de la planta habitacional cubana han producido altos picos de producción de cubiertas con vigas y losas de Fibrequén, con miras a la nueva construcción y también para la reposición. Cabe destacar que las viviendas construidas con esta solución no han sido afectadas por el paso de dichos huracanas de gran intensidad, lo que ha motivado una mayor aceptación de la población de la solución.

La solución presentada no se ha limitado en su empleo a la construcción de nuevas viviendas de bajo costo, sino que se ha generalizado también en el importante programa de mantenimiento constructivo, tanto en viviendas así como en la reparación de cubiertas y entrepisos en centros históricos dada la similitud constructiva con sistemas de épocas pretéritas y la carencia de madera en la actualidad e incluso se ha utilizado en el sector turístico.

VI. 4 - Ventajas Económicas de los Hormigones y Morteros Fibrorreforzados con Fibrequén.

El material fibrorreforzado con Fibrequén tiene ventajas económicas que se pueden analizar en diferentes direcciones vinculadas a las ventajas propias de este nuevo material tratadas en el Ep. 2.3 y que son:

- La introducción dentro del proceso productivo no requiere de variaciones tecnológicas del mismo, sino que se inserta de manera natural.
- Sustituye aceros secundarios.
- Mejoran un grupo importante de propiedades del material resultante asociadas a las resistencias, la durabilidad, la impermeabilidad, la densidad, la absorción y el desgaste, así como a la disminución de la retracción y por ende de la fisuración.
- Al usar el Fibrequén se humaniza el proceso constructivo, siendo su manipulación y empleo muy fácil.

Se cuenta con fibras de henequén suficientes para ser usadas reforzando hormigones y morteros, sin interferir en otras líneas de producción asociadas a las fibras; por demás los costos de producción son bajos y el recurso es renovable. En la introducción de los resultados se ha evaluado consecuentemente el efecto económico que cada una de las aplicaciones ha tenido para la economía nacional, donde se han medido el ahorro total de los recursos de la producción (humanos, materiales y financieros), además la humanización del proceso productivo.

Una estimación del ahorro obtenido, en valores, para la aplicación del Fibrequén contra las técnicas tradicionales de uso nacional, en cinco años (1988-1993) de las aplicaciones citadas sobrepasa los 15 millones de pesos. Este ahorro, por la forma que se produce, es aún más importante dada la coincidencia en tiempos de aplicación con periodos de recesión económica.

VI.5 – Conclusiones Parciales.

Conclusivamente podemos plantear:

- Se siguió un adecuado método para lograr la introducción en la práctica social de la solución de entrepisos y cubiertas con vigas y losas de Fibrequén.

- El resultado obtenido es viable, cumpliendo los requisitos necesarios del programa nacional de construcción de viviendas de bajo costo.

- Económicamente la solución planteada resalta como de las mejores dadas en el país.

- La aplicación práctica ha evidenciado que existe un positivo efecto económico y social de la solución dada.

- Los ahorros de recursos materiales, humanos y de tiempo que se obtienen son altos, así como se humaniza el trabajo de la construcción.

A manera de recomendaciones pudiéramos plantear la necesidad de una mayor divulgación nacional e internacional de la solución brindada, de manera tal que se pudiera lograr la generalización global pues es una solución competitiva y sobre todo viable en los países en vías de desarrollo y que cuenten con sisal y henequén.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES GENERALES ACERCA DE LA HORMIGONES Y MORTEROS FIBRORREFORZADOS CON FIBREQUÉN.

Para rangos de resistencias medias:

1) Se validó el nuevo material fibrorreforzado determinándose las características fundamentales del mismo y sus propiedades de empleo en el sector de la construcción.

2) Los métodos de modelación matemática han permitido determinar las correlaciones existentes entre las resistencias a la compresión, la

tracción y la flexión de los hormigones fibrorreforzados con Fibrequén en cuanto a las dosis y longitudes objetos de estudio y las correlaciones de las resistencias a la compresión y a la flexión para los morteros con iguales características y en dependencia de Dosis, Longitud y Tiempo.

3) La combinación óptima de empleo de hormigones y morteros fibrorreforzados con Fibrequén y que se corresponde con los mejores resultados resistentes, mayor demora en producirse la degradación y prontas y mayores recuperaciones es aquella donde la longitud de la fibra es de 38 mm y su dosis de inclusión de 3 KgF/m^3.

4) El nuevo material fibrorreforzado posee caídas resistentes, dada la degradación del Fibrequén en matriz cementicia y cuando dichas fibras no poseen protección, entre los 28 y los 67 días son las máximas caídas, tiempo a partir del cual se provoca la recuperación resistente de los mismos.

5) La evaluación de las fibras de henequén realizadas a partir de un método de simulación de laboratorio para evaluar el envejecimiento de la misma, que fue desarrollado como parte del presente trabajo, es válido. La evaluación de los métodos para contrarrestar el debilitamiento a partir del agente repelente de agua (PVF) y el agente bloqueador (cal) permitieron demostrar su inefectividad, por lo que no se recomienda su empleo.

6) Las recomendaciones para el uso del Fibrequén han permitido introducir los resultados de las investigaciones en la práctica social constructiva del país. Se han dado un grupo de aplicaciones exitosas al uso del Fibrequén reforzando hormigones y morteros.

7) La aplicación práctica del Fibrequén en Cuba ha evidenciado que existe un positivo efecto económico, traducido en ahorros de recursos

materiales, humanos y de tiempo, además de humanizar los trabajos constructivos.

8) Se reconoce que los aspectos que constituyen novedad científica dentro de la investigación son:
    a) Se ha logrado determinar experimentalmente los rangos de longitud recomendables para el empleo de fibras de henequén como refuerzo no estructural en los hormigones y morteros.
    b) Fue determinado que el Fibrequén tiene propiedades tales, que le permite su uso en reforzar hormigones y morteros con éxito.
    c) Se ha determinado experimentalmente, para las condiciones del Fibrequén, las fracciones de volúmenes críticos y recomendables teniendo en consideración aspectos estructurales y constructivos.
    d) Se estableció, de forma rigurosa, una correlación entre las resistencias a compresión, flexión y tracción indirecta de los hormigones fibrorreforzados con Fibrequén y en el caso de los morteros entre la compresión y la flexión.
    e) Se ha propuesto y verificado en la práctica un método de evaluación de las fibras de henequén a partir de una simulación en el laboratorio del proceso de envejecimiento.

BIBLIOGRAFIA

1. Anónimo, “El algodón y otras plantas Fibrotextiles”, Cuba, 1940.
2. Anónimo, “Fibrablock”, Per£, 1992.
3. Anónimo, “Forta CR Three-Dimensional Fibrous Polypropylene Reinforcement for Concrete”, USA, 1990.
4. Anónimo, “Natural Fiber Reinforced Concrete”, Comite 544 de la ACI, USA, 1991.
5. Anónimo, “Ensayo de Durabilidad de Fibras en Soluciones a Diferentes PH”, Instituto “Eduardo Torrojas”, España.
6. Anónimo, “Hormigones con Fibras. Determinación de la Resistencia a la Primera Fisura, Tenacidad e Indice de Tenacidad a Flexo-Tracción”, Norma Española, España, 1987.
7. Anónimo, “Construcciones Económicas a Base de Cemento y Fibras de Henequén”, Revista IMCYC de las experiencias en Kenya, Kenya, 1981.
8. Anónimo, “Directions for Using Fibermesh” , Fibermesh Company, USA, 1984.
9. Anónimo, “Reducción de la Segregación y Agrietamientos del Concreto Reforzado con Fibras, Fibercon”, Grupo Impercam, México, 1991.
10. Anónimo, “Harbourite. Synthetic Fibers for Stucco and Mortar”, Fibermesh, Inc., USA, 1985.
11. Anónimo, “Fibermesh to Guard Against Concrete Cracking Problems in Big, New Manufacturing Complex”, Fibermesh Inc., USA, 1985.
12. Anónimo, “Fibermesh, F.E.D. Report No. 1, 2, 3, 4, 5, 8”, Fibermesh Inc, USA, 1985 - 1991. USA, 1985.
13. Anónimo, “How Fibermesh Funtions as a Secundary Reinforcement”, Fibermesh Company, USA, 1984.
14. Anónimo, “Fibermesh. Fibras Sintéticas para Refuerzo del Concreto”, Fiberol S.A., México, 1991.
15. Anónimo, “Fibermesh. Micro Reinforcement System”, Fibermesh Company, USA, 1989.

16. Anónimo, “Fibermesh. Toma el control”, Fiberol S.A, México, 1991.
17. Anónimo, “Resultados de Estudios para en FRC de Polipropileno Medir el Agrietamiento, la Resistencia a Compresi¢n, Tensi¢n y Flexi¢n”, IMCYC, México, 1991.
18. Ahmad, S. H., y otros, “Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete”, Proceedings of the Second International Symposium on Ferrocement, Bangkok, Thailand, 14-16 C_Enero, USA, 1985.
19. Agopyan, Vahan, y otros, “Building Panels Mode with Natural Fibre Reinforced Alternatrive Cements”, Internatioinal Conference on Recent Developments in Fiber Reinforced Cements and Concretes, 18-20 Septiembre, Brasil, 1989.
20. Agopyan, Vahan, y otros, “Durability of Vegetable Reionforced Materials”, Instituto de Pesquizas Tecnológicas del Estado de Sao Pablo, 1986, Brasil.
21. Agopyan, Vahan, John Vanderley M., “Durability Evaluation of Vegetable Fibre Reinforced Materials”, Universidad de Sao Pablo, Building Researhch and Information, Volumen 20, Número 4, 1986, Brasil.
22. Akers, S.A.S., Studinka, J.B., “Againg Behaviour of Cellulose Fibre Cement Composites in Natural Weathering and Accelerated Tests”, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volumen 11, número 2, mayo 1989.
23. Acevedo Catá , Jorge, y otros, “Materiales de Construcción”, Ministerio de Educación Superior, 1985, Ciudad de La Habana, Cuba.
24. Aguado Crespo, “Materiales de Construcción” Tomos I y II, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Ciudad de La Habana, Cuba.
25. Auram C., Bob C., “Noitipuri de Betoane Speciale”, Editorial Tehnica, 1990, Bucarest, Rumania.
26. Babé Ruano, Manuel, “Aplicación del Sistema Internacional de Unidades al Cálculo de Hormig¢n Armado”, 1986, Ciudad de La Habana, Cuba.
27. Bentur, A., y otros, “The Microestructure and Againg of Celulose Fibre Reinforced Cement Composites Cured in a Normal

Enviroment", International Journal of Cement Composites and LightWeight Concretes, 1989, USA.

28. Bondarenko, V., y otros, "Cálculo de Estructuras de Hormigón Armado y de Piedra", Editorial MIR, 1990, Moscú.
29. Blanco Torrens, Roberto, y otros, "Materiales de Construcción", 1990, Ciudad de La Habana, Cuba.
30. Baykov, V.N., y otros, "Estructuras de Hormigón", Editorial MIR, 1982, Moscú.
31. Burakiewicz, Andrzej, y otros, "Applicability of Secondary Materials for Lowcost Housing in Developing Countries", Diciembre 1988, Suecia.
32. Baykov, V.N., y otros, "Estructuras de Hormigón Armado", Editorial MIR, 1986, Moscú.
33. Castro, J., y otros, "Cementmorter Reinforced with Natural Fibers", Journal of Ferrocement, 1981, México.
34. Cox, Frank B., y otros, "Concreto Reforzado con Bambú", 1970, USA.
35. Cejudo, Luis, "El Fibrocemento en la Construcción Moderna", 1987, Mérida, México.
36. Centeno, Roberto, "Inspección y Control de Obras Civiles", Editorial Vega, 1993, Venezuela.
37. Calero, Arístides, "Estadística II", Cuba.
38. Cué, Juan Luis, "Estadística, Parte II", Cuba.
39. Daniel, J.I., y otros, "Thin-Section Fiber Reinforced Concrete and Ferrocement", ACI, 1991, USA.
40. Esclarazán Fernández, Pablo, "Hilos, Jarcias, Cordeles de Fibras de Henequén", MINAGRI, 1964, La Habana, Cuba.
41. Férnandez González, Alonso, Castro Borges, Pedro, "Mortero Reforzado con Sosquil para Construcciones Térmicas y Antisísmicas", 1987, Mérida, México.
42. Fibrablock (Ed.), "Fibrablock. Una Nueva Alternativa para la Construcción", 1993, Perú.
43. Feodosiev, V.I., "Resistencia de Materiales" Tomos I y II, Editorial Pueblo y Educación, 1979, Ciudad de La Habana, Cuba.

44. Fernández Cánovas, Manuel, “Patologia e Terapia do Concreto Armado”, Editorial Pini Ltda, 1993, Brasil.
45. Gram, Hans-Erik, “Durability of Natural Fibers in Concrete”, Reporte de Investigación, 1983, Suecia.
46. Gram, Hans-Erik, “Natural Fibre Concrete Roofing”, 1990, Suecia.
47. Gram, Hans-Erik, Andersson Ronny, “Roofing sheets made of Morter Reinforced with Natural Fibers”, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1986, Suecia.
48. Gram, Hans-Erik, “Durability of Natural Fibers in Concrete”, 1990, Suecia.
49. Guimaraes, S., “Vegetable Fiber-Cement Composites” , CEPED, Comacari, Bah¡a, 1990, Brasil.
50. Gorchakov, G.I., “Materiales de Construcci¢n”, Editorial MIR, 1984, Moscú.
51. Hoque, M.M., y otros, “Futs-crack Strength in Direct Tension of Cement Mortar Reinforced with Short Steeel Fibers”, Proceeding of Second International Symposium on Ferrocement, Bangkok, Thailand, 14-16 enero, 1985.
52. Hun Do, Le, “Láminas de Cemento con Fibras Botánicas”, Viet Nam, 1987.
53. Hernández Alvarez, Paulino, “Materiales de Construcción, Estática y Elementos de Hormigón Armado”, Editorial Pueblo y Educación, 1979, Ciudad de La Habana, Cuba.
54. Hermite, Robert L., “A Pie de Obra”, Editorial Tecnos, 1969, Madrid, España.
55. Hass, A.M., “Láminas de Hormigón”, 1971, Madrid, España.
56. Indureza Putzmeister, S.A. (Ed), “Hormig¢n o Mortero Reforzado con Fibras”, 1991, España.
57. Krah, Paul, “El Efecto de las Fibras Sintéticas en el Cemento”, 1988, USA.
58. Kowalski, T.G., “Ventajas del Bamb£ como Refuerzo del 59. Krenchel, H., “Fiber spacing and Specific fiber Surface, Fiber Reinforced Cement and Concrete”, RILEM Symposium, the Construction Press Ltd, Lancoster, Pág. 69..79, 1975, Dinamarca.

59. López Santana, Jos' M., y otros, "Hormigones con Residuos Orgánicos e Industriales", Centro Técnico de la Construcción y los Materiales, Ciudad de La Habana, Diciembre 1985, Cuba.
60. Lim, T.Y., y otros, "Bending Behavior of Steel Fiber Concrete Beams", ACI Structural Journal, Nov.1987.
61. Macías Mesa, José A., "Recomendaciones para Pisos de Terrazo Integral con Fibras de Henequén", MICONS, Ciudad de La Habana, Cuba, 1990.
62. Macías Mesa, José A. y Artola Pimentel Maria de Lourdes, "Pisos de Terrazo Integral con Fibrequén", I Congreso Nacional de Uso de Cemento, Suelo Cemento y Ferrocemento, Ciudad de La Habana, Cuba, 1990.
63. Macías Mesa, José A. y Cuello Sangles, Francisco, "Experiencias en la Impermeabilización de los Almacenes de Alimentos de Jovellanos", MICONS, Ciudad de La Habana, Cuba, 1991.
64. Macías Mesa, José A. y Díaz Delgado, José R., "Utilización de Hormigones y Morteros con Fibras de Henequén", Revista de Ingeniería Civil No. 1, Ciudad de La Habana, Cuba, 1990.
65. Macías Mesa, José A. y Artola Pimentel Maria de Lourdes, "El Fibrequén en la Construcción en Cuba", II Simposio sobre Materiales de Construcción, Editorial Dirección General de Extensión de la UADY, M'rida, M'xico, 1991.
66. Macías Mesa, José A. y Ramírez Fors, Pablo, "Diseño de Tanque Cilíndrico Multianular de Fibrequén", IV Simposio Internacional y III Congreso Nacional de Ferrocemento, Ciudad de La Habana, Cuba, 1991.
67. Macías Mesa, José A.y Artola Pimentel, Maria de Lourdes, "El Fibrequén en la Construcción", IV Simposio Internacional y III Congreso Nacional de Ferrocemento, Ciudad de La Habana, Cuba, 1991.
68. Macías Mesa, José A. y Artola Pimentel, Maria de Lourdes, "Resultados de las Investigaciones Acerca del Uso del Fibrequén en Hormigones y Morteros", IV Simposio Internacional y III Congreso Nacional de Ferrocemento, Ciudad de La Habana, Cuba, 1991.

69. Macías Mesa, José A. y Artola Pimentel, Maria de Lourdes, “Utilización de Fibras Orgánicas de Henequén en el Proceso Constructivo en Cuba”, I Encuentro de los Ingenieros Civiles Iberoamericanos, Cáceres, España, 1992.
70. Macías Mesa, José A. y Díaz Delgado, José R., Certificado de Autor de Invención: Composición de Hormigones y Morteros con Fibras de Henequén, Certificado No. 22 186, Resolución No. 1 704, ONIITM, 1993.
71. Mingzhong, Wu, “Use of Sisal as Fiber Reinforcement in Rice Husk Ash Mortar”, Asian Institute of Tecnology, 1989, China.
72. Martínez, Juan, “La Compañía de Jarcia de Matanzas”, Magazine La Lucha, 1940, Matanzas, Cuba.
73. Menéndez Menéndez, José, “Desperfectos en Construcciones de Ingeniería y Arquitectura”, MICONS, 1986, Ciudad de La Habana, Cuba.
74. Mena F., Victor Manuel, y otros, “Guía para Fabricación y Control de Concreto en Obras Peque¤as”, Editorial UNAM, 1972, México.
75. Medina Torri, Francisco, Ruiz Alejo Leonardo, Babé Ruano Manuel, “Hormigón Armado” tomos I, II, III, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Ciudad de La Habana, Cuba.
76. Narayanan, R., y otros, “Use of steel Fibers as Shear Reinforcement”, ACI Structural Journal, Mayo-Junio 1987, USA.
77. Nelsson, Lennart, “Reinforcement of Concrete with Sisal and other Vegetable Fibers”, Editorial Swedish Council for Building Research, 1975, Estocolmo, Suecia.
78. Ortiz, Félix, “Planchas de Sisal-Cemento”, Tecnología Apropiada, 1988, República Dominicana.
79. O’Really D¡az, Vitervo A., “Métodos para Dosificar Mezclas de Hormigón”, Editora Científico-Técnica, 1990, Ciudad de La Habana, Cuba.
80. Paul, B.K., Pama R.P., “Ferrocemento”, Instituto Nacional del Cemento y del Concreto, 1981, Ciudad México, México.
81. Pama, R.P., y otros, “Behavior of a Bambo Fibre Cement Paste Composite”, Journal of Ferrocement, Bangkok, Tailandia, 1983.

82. Pama, R.P., y otros, “Mechanical Properties of Cement Mortar with Randomly Oriented Short Stell Wires”, Asian Institute of Technology, Bangkok, Tailandia, Magazine of Concrete Research Volumen 26, N£mero 86 Marzo 1974.
83. Pakotiprapha, B., y otros, “Analysis of a Bambu Fibrecement Paste Composite”, Journal of Ferrocement, Bangkok, Tailandia, 1983.
84. Paramasivan, P., y otros, “Properties of Steel Fiber Reinforced Mortar”, Journal of Ferrocement, Bangkok, Tainlandia, 1978.
85. Robles-Austríaco, L., y otros, “Reinforcing with Organic Materials”, Concrete International, noviembre 1983.
86. Ramaswamy, H.S., y otros, “Comportamiento del Concreto Reforzado con Fibras de Yute, Coco y Bambú, 1983, India.
87. Rodríguez, Margarita, y otros, “Metodología para Ensayos de urabilidad a la Intemperie de Materiales y Productos para Terminaciones Superficiales”, Ciudad de La Habana, 1990, Cuba.
88. Rivera, Noemí, y otros, “Empleo de Fibras y Desechos Vegetales como Materia Prima para Elementos Constructivos”, Revista Ingeniería-Construcción, Número 8, 1990, Cuba.
89. Rabilero, Antonio, “Las Puzolanas”, Editorial Oriente, 1988, Santiago de Cuba, Cuba.
90. Robles-Austriaco, L., y otros,”Ferrocement canal Living”, International Ferrocement Information Center, Bangkok, Tainlandia, 1987.
91. Romualdi, J. P. y Mandel, J.A., “Tensile Strenght of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengt of Wire Reinforcement”, Journal of the Americal Concrete Institute, Proceedings Vol. 61, No. 6, Pág. 657-671, 1964, USA.
92. Rodríguez, Aida, “Estadística II”, Cuba.
93. Sosa Estrada, William, “El Henequén. Breve Historia”, 1992, Mérida, México.
94. Skarendahl, Ake, “Natural Fibre Concrete for Roofing”, 1982, Tanzania.

95. Shafiq, Nasei, “Durability of Natural Fibers in Mortar Cointaining Rice Husk Ash”, Asian Institute of Technology, Bangkok, Tailandia, Abril 1987.
96. Shuarults, Kurt, “Soluciones de Cubiertas Económicas a Partir de Tejas de Fibroconcretos”, 1991, Suiza.
97. Swamy, R.N., “Progress in Fibre Reinforced Concrete”, Inglaterra, 1973.
98. Sera, E., Robles-Austriaco, L., y otros, “Natural Fibers as Reinforcement”, Asian Institute of Technology, 1988.
99. Schmidt, Werner, “Algunos Aspectos de la Sustitución del Asbesto Cemento”, 1983, Alemania.
100. Sequeira, José, “Prontuario sobre Hormigón Hidraúlico”, MICONS, Ciudad de La Habana, Cuba.
101. Sashi, k., y otros, “Ferrocement Roofing Element”, International Ferrocement Information Center, 1985, Bangkok, Tailandia.
102. Sharma, P.C., y otros, “Ferrocement Water Tank”, International Ferrocement Information Center, 1985, Bangkok, Tainlandia.
103. Sutter E, Patrick, “La Utilización del Adobe en la Construcción”, Instituto Nacional de Patrimonio Cultural, 1986, Quito, Ecuador.
104. Sutter E, Patrick, “Hagamos Nuestra Casa”, Instituto Nacional de Patrimonio Cultural, 1986, Quito, Ecuador.
105. Stiopin, P.A., “Resistencia de Materiales”, Editorial MIR, 1979, Moscú.
106. Torroja Miret, Eduardo, “Razón y Ser de los Tipos Estructurales”, 1991, Madrid, España.
107. Torres Puentes, Magalys, y otros, “Consideraciones Acerca de los Cambios Morfológicos en la Fibra de Henequén (Agave Fourcroydes) Utilizados en Hormigones en Condiciones de Laboratorio”, 2003, Cuba.
108. Vondran G., y otros, “Relación de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno con Permeabilidad”, 1991, Cleveland, USA.
109. Varios, “Proceedings of the International Simposium on Fibre Reinforced Concrete” Tomos I, II y III, Editorial Oxford & IBH Publishing Co., 1987, Madras, India.

110. Varios, “Resúmenes del II Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y IV de Control de Calidad Tomos I y II”, 1993, Venezuela.
111. Varios, “Use of Vegetable Plants and Their Fibres as Building Materials Joint Symposium”, Editorial RILEM, NCCL,CIB, 1996, Baghdad, Iraq.
112. Varios, “Guía para la Durabilidad del Concreto”, Suplemento Mexicano del Informe del Comité ACI 201, 1989, Ciudad México, México.
113. Varios, “Cartillas Técnicas del Hormigón del Instituto Torroja”, MICONS, 1968, Ciudad de La Habana, Cuba.
114. Varios, “Plataforma Programática del PCC”, 1976, Ciudad de La Habana, Editorial Instituto Cubano del Libro, Cuba.
115. Varios, “El Impacto de los Materiales en la Calidad de las Obras”, II Simposio Nacional Sobre Materiales de Construcción, Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán, 1991, México.
116. Varios, “Comportamiento Di Strutture in Conglomerato Cementizio Fibrorinforzato, Comissione per le Norme relative Alle Construzioni, 1991, Italia.
117. Wainshtok Rivas, Hugo, “Gula para el Diseño y Construcción de Elementos de Ferrocemento”, ISPJAE, 1986, Ciudad de La Habana, Cuba.
118. W. Draper, H. Smith, Applied Regression Analysis, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad Habana, 1980.
119. www.lafgroup.com.au/ fire-protection-of-carbon-fibre-reinforcing-polymers.htm
120. www.isiscanada.com/manuals/No3_contents.pdf
121. www.cfcao.com/reinforc.htm
122. www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/ mitarbeiter/basche/lacer4_cfk.pdf
123. www.lafgroup.com/carbon_fibre_reinforcing_polymer.htm
124. www.sciencevision.org.pk/CURRENT/PDF/ interfacial%20debonding%20of%20natural%20fibre.PDF
125. www.radmix.com/radmixinfo.pdf

TABLAS y GRAFICOS

Tabla No. I

Características Físico Mecánicas de las Fibras

Tipo Fibra	Diámetro (μ)	Densidad (kg/m3)	Retracción (KN/mm2)	Módulo de Elasticidad (KN/mm2)	Alarg. Rotura (%)	Coef. Calidad (MNm/kg)
Asbesto	0.02-20	3200	0.5-0.3	80-150	0.5-2	0.15-0.9
Algodón	10	2700	0.5-0.8	70-120	0.6	0.18-0.3
Mineral						
Algodón	-	1500	0.4-0.7	5	3-10	0.27-0.5
Grafito	8-9	1900	1.8-2.6	200-380	0.5-1	0.95-1.4
Acero	5-800	7850	1.0-3.0	210	3-4	0.13-0.4
Vidrio	9-15	2500	1.0-4.0	70-80	1.5-3.5	0.4-1.6
Poliet.	20-200	950	0.7	0.14-0.42	10	0.74
Poliprop.	20-200	900	0.5-0.8	3.5-5.0	20-25	0.55-0.9
Poliest.	20-200	950	0.7-0.9	8.4	11-13	0.74-0.9
Sisal	10-50	1500	0.8	27	3	0.53

Tabla No. VI
Propiedades Típicas de las Fibras Naturales

Tipo de Fibra	Coco	Sisal	Bagazo	Bambú	Yute	Flax
Longitud (mm)	50-350	NA	NA	NA	180-300	500
Diámetro (mm)	0.1-0.4	NA	0.2-0.4	0.05-0.4	0.1-0.2	NA
Grav.Esp.	1.12-1.15	NA	1.2-1.3	1.5	1.02-1.04	
Mód. El. (KN/mm^2)	19-26	13-26	15-19	33-40	26-32	100
R. Ult. (N/mm^2)	120-200	280-568	170-290	350-500	250-350	1000
Elong. (%)	10-25	3-5	NA	NA	1.5-1.9	1.8-2.2
Absorción Agua (%)	130-180	60-70	70-75	40-45	NA	NA

NA : No Aplicable V: Variable

Tabla No. VII
Propiedades Mecánicas de Diferentes Tipos de Fibras

Tipo de Fibra	Di m. Prom. (mm)	Long. Prom. (mm)	Absorc. a 24 h (%)	Dens. Prom. (g/cm^3)	Tens. Prom. (g/cm^3)	Adher. Elong. Prom. (MPa)
BAGAZO	0.5	35	122.5	0.639	24.6	0.25
NA						
COCO	0.68	280	58.5	0.58	60.8	0.28
2.6						
YUTE	0.108	400	62.0	1.28	369.0	0.139
NA						
MAGUEY	0.35	400	63.0	1.24	375.0	NA
NA						
LECHUG.	0.347	400	102.0	1.36	373.0	NA
NA						
GUANEY	0.434	443	129.9	1.195	345.0	0.28
2.88						
BAMBU	V	V	51.0	0.72	377.0	0.312
1.80						

Tabla No. XIII

-Aridos Gruesos.

.Procedencia : Cantera Antonio Maceo de Coliseo.

.Granulometría :

Támicez	% Pasado
19.1	96
12.7	26
9.52	10
4.76	7

.Partículas blandas y suaves……..…….0.9 %

.Partículas planas y alargadas…….. 3.47 %

.Coeficiente de trituración seco……11 %

.Tamaño máximo……..19 mm

.Peso especifico corriente……..2.43 kg/l

.Peso especifico saturado……2.52 kg/l

.Peso especifico aparente……2.66 kg/l

.Peso unitario suelto……1370 kg/m^3

.Peso unitario compactado……1490 kg/m^3

.Absorción……..…….2.56 %

.Abrasión……21.4 %

.Material mas fino T 200……..2 %

.% de vacío……38.68 %

-Áridos Finos.

.Procedencia : Cantera Regalito de Cárdenas.

.Granulometría :

Tamices	% Pasado
9.52	100
4.76	86
2.38	54
1.19	33
0.59	19
0.295	11
0.149	5

.Módulo de finura……3.92

.Peso especifico corriente…….2.58 kg/l

.Peso específico saturado……..2.63 kg/l

.Peso específico aparente……..2.71 kg/l

.Peso unitário suelto……1380 kg/m

.Peso unitário compactado……. 1580 kg/m^3

.Absorción.....1.85 %

.% vacio..... 38.76

.Placa colorimétrica.....< 1

.Material m s fino T 200.....5.2 %

.Terrones de arcilla……. 0 %

-Cemento.

.Procedencia……..Fábrica Carlos Marx de Cienfuegos

.Calidad……..P 350

.Finura de molido…….2.07 %

.Peso específico…….3.20 g/cm^3

.Consistencia normal……..25 %

.Tiempo de fraguado inicial……150 minutos

Tabla No. XIV

ANALISIS DE COMPRESION

	HORMIGONES			MORTEROS		
	T	NIVEL CONFIANZA	FISHER CALCULADO	T	NIVEL CONFIANZA	FISHER CALCULADO
	3	1%	7.018E-04	3	32%	0.172
	7	98%	7.660	7	28%	0.131
	28	91%	3.176	28	73%	1.294
		CLASIFICACION SIMPLE			CLASIFICACION DOBLE	
FIBRAS		1%	7.211E-03		37%	0.235
TIEMPO		99.95%	95.436		100%	22.732
INTERACC.		95%	3.924		64%	1.051

ANALISIS DE LA FLEXION

	HORMIGONES		MORTEROS		
	T	**NIVEL CONFIANZA**	**FISHER CALCULADO**	**T**	**NIVEL CONFIANZA**	**FISHER CALCULADO**
	7	73%	1.295	3	71%	1.199
	28	79%	1.727	7	82%	2.013
				28	90%	3.159
	CLASIFICACION SIMPLE			**CLASIFICACION DOBLE**		
FIBRAS		100%	36.904		99%	6.094
TIEMPO		91%	3.013		100%	48.736
INTERACC.		10%	0.039		16%	0.174

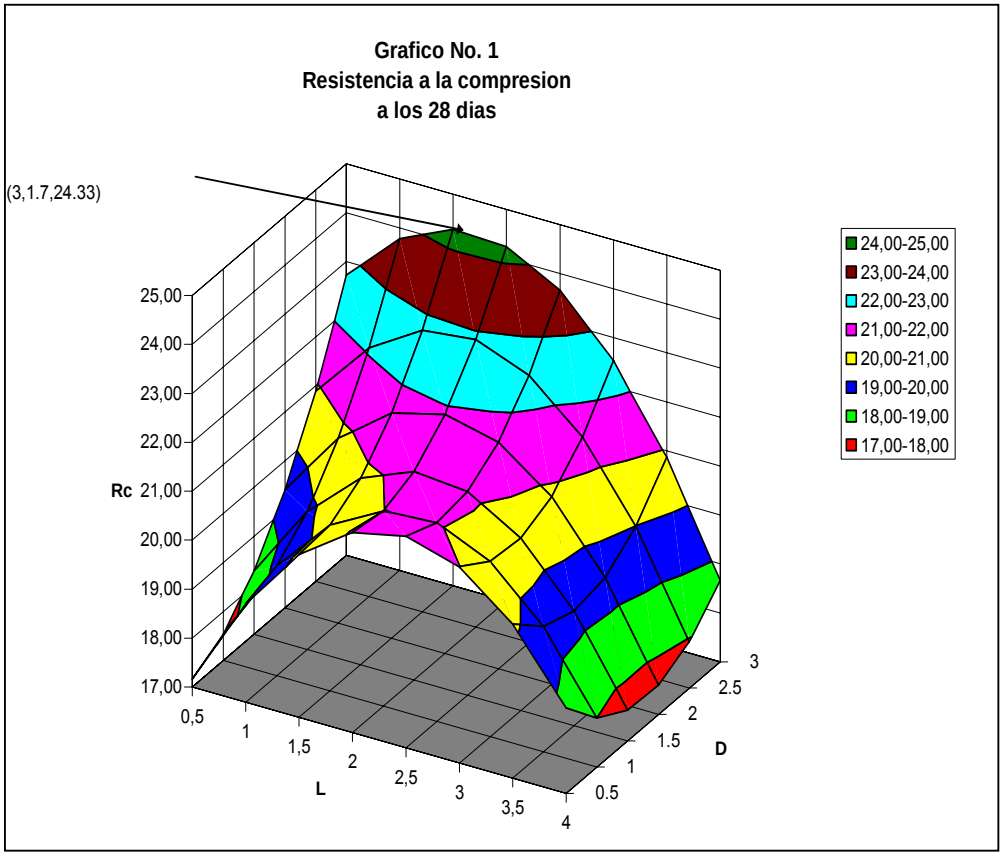


Grafico No. 1
Resistencia a la compresion
a los 28 dias
(3,1.7,24.33)
Rc
25,00
24,00
23,00
22,00
21,00
20,00
19,00
18,00
17,00
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
L
3
2.5
2
1.5
1
0.5
D
24,00-25,00
23,00-24,00
22,00-23,00
21,00-22,00
20,00-21,00
19,00-20,00
18,00-19,00
17,00-18,00

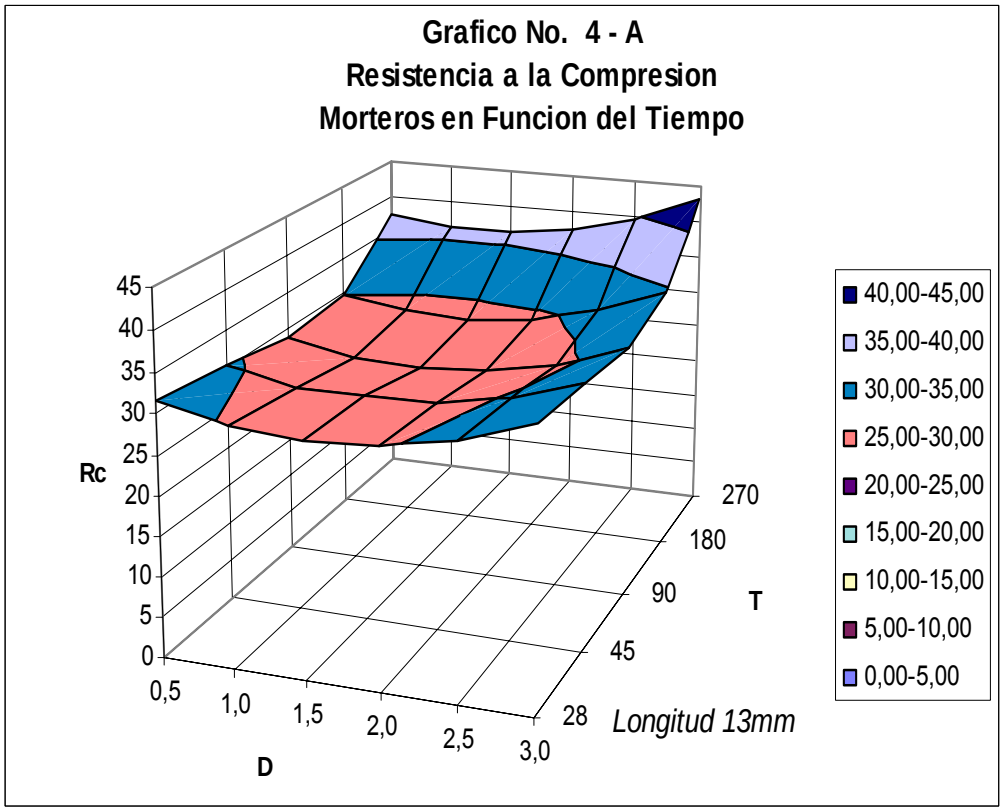


Grafico No. 4 - A
Resistencia a la Compresion
Morteros en Funcion del Tiempo
Rc
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
D
270
180
90
45
28
T
Longitud 13mm
40,00-45,00
35,00-40,00
30,00-35,00
25,00-30,00
20,00-25,00
15,00-20,00
10,00-15,00
5,00-10,00
0,00-5,00

Grafico No.4-B
Resistencia a la Compresion
Morteros en Funcion del Tiempo

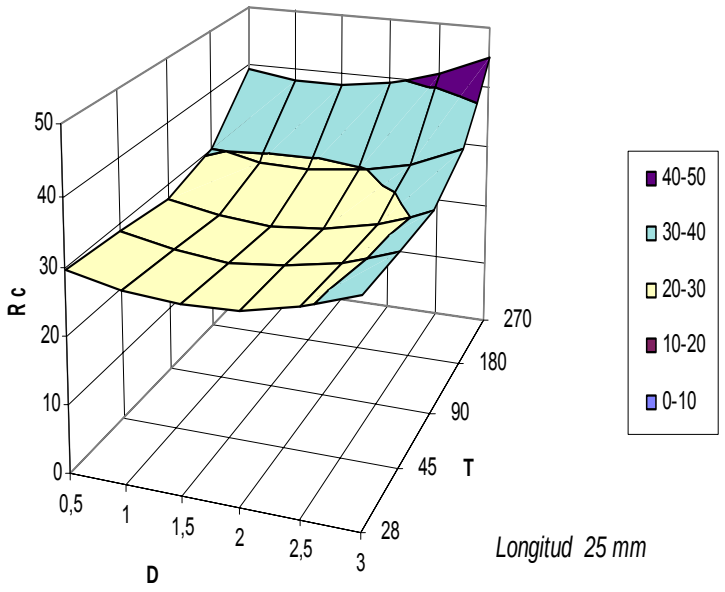


Grafico No. 4-C
Resistencia a la Compresion
Morteros en Funcion del Tiempo

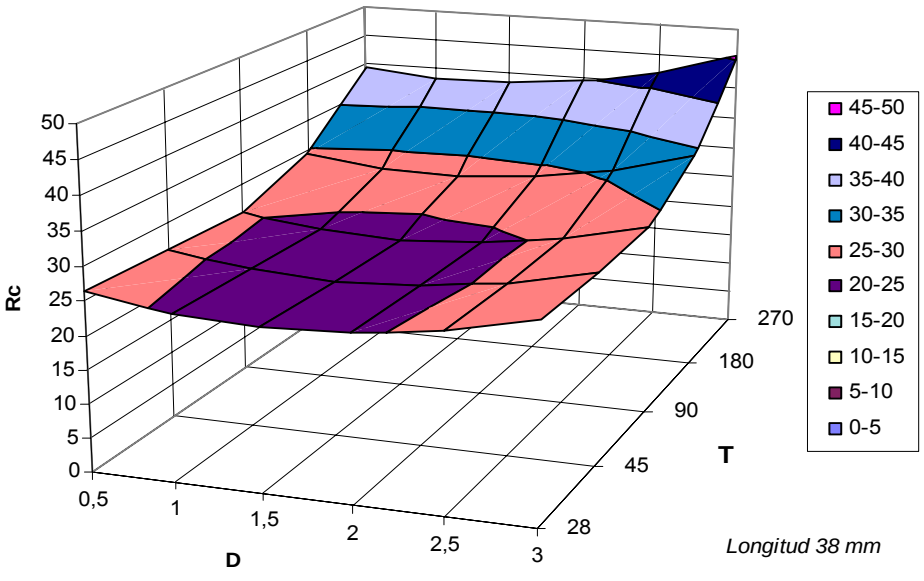
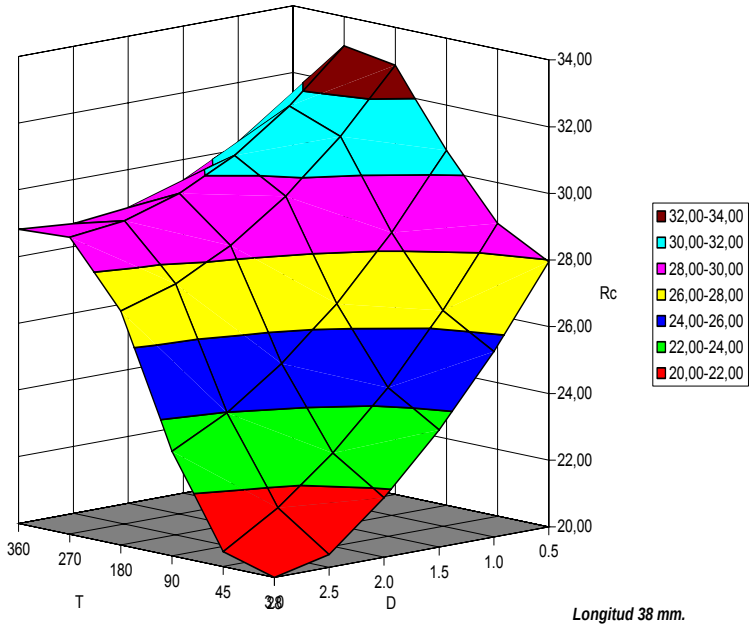
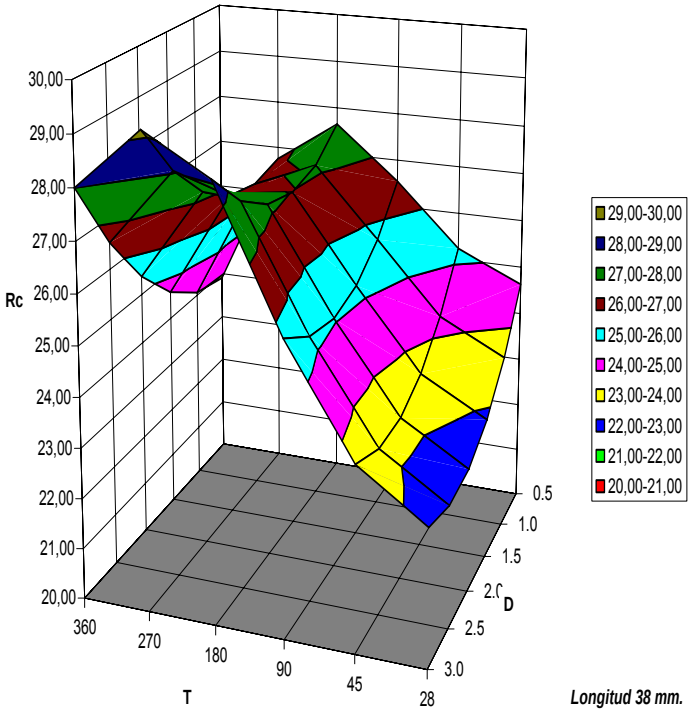


Grafico No. 6
Resistencia a la Compresion
Morteros con Fibrequen y PVF



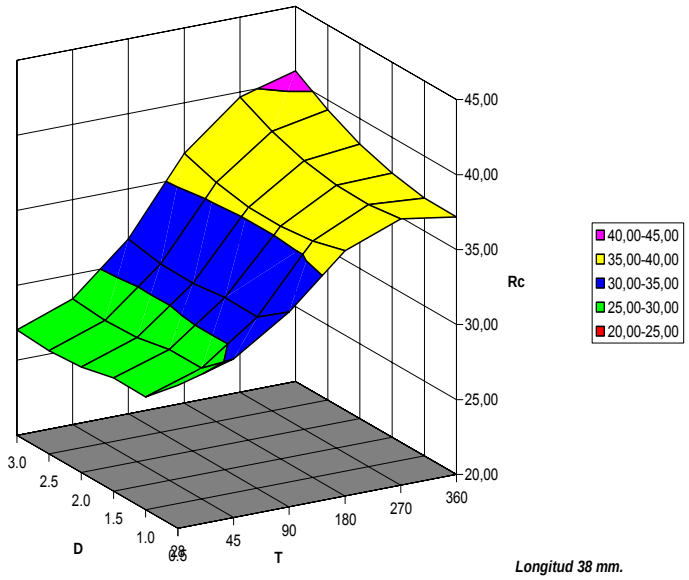
Longitud 38 mm.

Grafico No. 7
Resistencia a la Compresion
Morteros con Fibrequen y Cal



Longitud 38 mm.

Grafico No. 8
Resistencia a la Compresion
Morteros con Fibrequen



Longitud 38 mm.