

fiber-glass, plásticos y hierro-cemento. Considerando las características de costo y posibilidades de autoconstrucción, el material más promisorio parece ser el fibro-cemento, pues hay la posibilidad de empleo de nuevos materiales, y de aprovechar la mano de obra de los autoconstructores. El hierro-cemento, aunque de ejecución sencilla, emplea telas metálicas de alto costo.

1.2. Características del fibro-cemento.

El fibro-cemento es un material compuesto, cuya mejor parcela en volumen y peso corresponde a la matriz de cemento que envuelve las fibras. "El concepto de cemento reforzado con fibras es usar la deformación de la matriz bajo tensión para transferir cargas para las fibras¹". Entre los varios tipos de fibras, las más baratas son indudablemente las fibras naturales y entre ellas, las fibras vegetales, las cuales pueden ser obtenidas en abundancia, mismo por las poblaciones de más bajos ingresos. Entre las fibras vegetales ya ensayadas, están las de sisal, cuyos resultados publicados demuestran que lo mismo optimizando los procedimientos de producción y el porcentaje de fibras, los valores obtenidos quedan abajo de los obtenidos con asbestos-cemento o fibras sintéticas². Otras fibras vegetales también testadas fueron las de "piacava", cuyos resultados demuestran no haber mejora en la resistencia de placas sometidas a flexión, con mejora exclusivamente con relación al impacto^{3y4}.

Además de éstas, la literatura menciona todavía con alguna frecuencia el bambú como poseedor de fibras de buena resistencia, a pesar de que su uso esté normalmente restringido a barras enteras o seccionadas longitudinalmente, en sustitución a las armaduras de acero⁵. El uso del bambú en fibro-cemento ha sido poco divulgado, debido básicamente al problema de separación de las fibras. Tal separación es normalmente obtenida por procesos químicos, lo que dificultaba su utilización en comunidades más carentes, aumentando el costo de la inver-

sión.

Este trabajo describe una técnica más sencilla de desfibramiento y presenta los primeros resultados de ensayos con un material que llamaremos de bambú-cemento.

2.0. El bambú-cemento

El análisis de la bibliografía citada y de otros autores revela que uno de los grandes problemas con fibras vegetales es su baja adherencia (de las fibras) a la matriz de cemento. Para investigar el problema, fueron ejecutados algunos cuerpos de prueba iniciales, que consistían en placas de aproximadamente 30 x 30 cm, con argamasa de arena y cemento (relación 1.1), y porcentajes variables de fibras (entre 1 y 5%), las cuales tenían 10 a 15 cm de largo por 0,5 a 1,0 mm de diámetro.

La ruptura manual de las fibras después de 7 días de cura, demostró que las fibras realmente deslizaban dentro de la matriz de mortero, no siendo así exigidas hasta su límite de resistencia a tracción. Una de las hipótesis para explicar el problema en presencia del agua creaba un determinado espacio dentro de la matriz⁶. Cuando la matriz y las fibras secaban, las fibras se contraían de nuevo, despegándose del mortero, perdiendo así su adherencia. Otra hipótesis era que la poca adherencia era debida a la falta de rugosidad de las fibras, combinada con el hecho de poderse deformar cuando eran traccionadas.

2.1. Ensayos de adherencia.

Para ensayar las dos hipótesis, fueron preparados ensayos de arrancamiento de fibras individuales (fig. 1 y 2). Algunas fibras fueron tratadas con diferentes sustancias impermeabilizantes (betún, un preparado a base de silicones y un barniz impermeabilizante). Tales tratamientos buscaban evitar que las fibras absorbiesen agua, no pudiendo así sufrir el proceso de hinchamiento-retracción, aumentando su adherencia. Otras fi-

bras fueron bañadas en cola e impregnadas con arena fina para aumentar la adherencia a la matriz. Finalmente, otras fibras fueron dejadas "in natura" para comparación de resultados. Todas las fibras tenían 1 mm x 1 mm de sección y fueron empotradas 3 cm en la argamasa.

Los resultados obtenidos (tabla 1) muestran claramente que:

- a) Las fibras "in natura" realmente poseen baja adherencia a la argamasa. Los resultados del ensayo de rotura de las fibras (tabla 2), muestran que, tomado un valor límite de resistencia a tracción de 223 N/mm² la adherencia proporcionada por un empotramiento de 3 cm aprovecha solamente 2,1% de la resistencia de la fibra a tracción.
- b) Los tratamientos impermeabilizantes no registraron ninguna mejora con relación a las fibras "in natura", hasta por el contrario, en algunos casos empeoró. Los bajos resultados fueron probablemente causados por el hecho de que los impermeabilizantes han producido una superficie todavía más lisa en la fibra y esto no fué compensado por una menor variación dimensional. Los resultados nulos se deben a la falta de sensibilidad de la máquina de ensayos.
- c) El tratamiento a base de cola más arena presentó sensibles mejoras con relación a las fibras "in natura".

Frente a tales resultados, dos caminos se presentaban para la continuación de la pesquisa: o se mantenían las fibras sin tratamiento y se disminuía su diámetro, aumentando la relación superficie de adherencia/sección transversal; o se mantenía el diámetro utilizado, aumentando la adherencia artificialmente, con cola y arena.

En el caso de desear aumentar la relación superficie/sección transversal, el diámetro medio tendría que ser tal que

$$F_a \geq F_t \quad (1), \text{ donde}$$

F_a es el esfuerzo máximo permitido por la adherencia, antes del arrancamiento de la fibra, y F_t es el esfuerzo límite de tracción de la fibra antes de su ruptura.

De acuerdo con Buckley y Everard⁷, la ecuación que iguala las dos fuerzas de la ecuación (1) es

$$\epsilon \pi d T_a = \frac{\pi \epsilon^2}{4} T_t \quad (2)$$

donde: ϵ = largo de empotramiento (en mm)

d = diámetro de la fibra (en mm)

T_a = tensión permitida por la adherencia (en mm²)

T_t = tensión de ruptura por tracción de la fibra (en mm²)

Así, el diámetro ideal de las fibras puede ser expresado en función de su tamaño:

$$d = \frac{4 \epsilon T_a}{T_t} \quad (3)$$

Considerando los resultados de los ensayos hechos, tenemos:

$$T_a = 4,7 \times 10^{-2} \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Y } T_t = 2,23 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$$

Así, el valor del diámetro es:

$$d = 8,40 \times 10^{-4} \epsilon \quad (4)$$

Sin embargo, el largo total de la fibra deberá ser dos veces el valor de ϵ , para que las dos mitades de la fibra estén bien adheridas a la matriz. Tomándose un valor arbitrario de $\epsilon = 20$ mm tendremos $d = 1,68 \times 10^{-2}$ mm, lo que es un valor imposible de ser obtenido por medios mecánicos. Los meno

res diámetros que se puede obtener fueron alrededor de 0,1 mm al que correspondería a un largo de fibra de 238 mm, que es también imposible de ser obtenido, pues las fibras se apartan en segmentos mucho menores durante el proceso de separación. Así, quedó claro que no se podría utilizar toda la resistencia de la fibra sin un tratamiento para aumentar su adherencia a la matriz.

Con la utilización de cola más arena, el valor de t_a fué $T_a = 0,4 \text{ N/mm}^2$. El valor del diámetro puede ser expresado en función del largo de empotramiento según el mismo raciocinio ya presentado:

$$\delta = 7 \times 10^{-3} \epsilon \quad (5)$$

Para $\epsilon = 20 \text{ mm}$, $\delta = 0,14 \text{ mm}$, lo que es bien más razonable. Además, para mayores largos, el diámetro puede ser aumentado también. Tomando $\delta = 1,0 \text{ mm}$, tenemos $\epsilon = 142,8 \text{ mm}$ y el largo total de aproximadamente 285 mm, lo que es absolutamente factible por medios mecánicos. La relación entre δ y ϵ puede ser todavía mejorada, con el uso de colas más eficientes, además el proceso de desfibramiento puede ser mejorado con el

Una evaluación de diferentes tipos de colas (tabla 3) para la mejoría de la adherencia de las fibras mostró que los resultados obtenidos con colas epoxi son notablemente buenos. Los valores utilizándose Isocola (marca comercial) también fueron muy buenos, mientras que los resultados obtenidos con una cola vinílica fueron apenas razonables.

Con los resultados obtenidos, tentose definir el valor de T_a con el uso de colas epoxi. Fueron realizados ensayos de arrancamiento, con empotramientos de 1,0 y 2,0 cm de largo (tabla 4). Los resultados fueron perjudicados por la rotura precoz de las fibras. Sin embargo, se pudo comprobar que los empotramientos de 1 cm eran capaces de soportar esfuerzos del orden de 100 N, en fibras de 1 mm^2 . La tensión máxima de adherencia T_a para este tipo de cola es aproximadamente $2,5 \text{ N/mm}^2$

que es un valor excelente. Lo que limita la utilización de esta cola es su costo muy alto.

2.2. Placas de bambú-cemento.

A partir de los resultados obtenidos con fibras individuales, fueron ejecutadas placas de 25,0 x 40,0 cm con 1,0 cm de espesor, para ser rotas por flexión.

El proceso de desfibramiento de bambú consistía en cortar los segmentos internodales y dividirlos longitudinalmente en varias partes. Después, los pedazos pasaban sucesivas veces, por el desfibrador (fig. 3), hasta que hubiese una desagregación parcial de las fibras, que eran entonces nuevamente pasadas por el desfibrador, pero ahora acoplado a un juego de láminas, espaciadas de 1,7 mm entre sí. Las láminas separaban el bambú en fibras que eran entonces cortadas en el largo deseado.

Después de su obtención, las fibras eran tratadas con cola a base de caseína diluida en alcohol en la proporción 1:1 en volumen. La dilución, a pesar de disminuir la adherencia, proporciona una mayor fluidez a la cola (antes muy viscosa), además de proporcionar una economía considerable. Las fibras embebidas con cola y enarenadas, eran colocadas en una estructura metálica, la cual era entonces prensada hasta que se obtuviese el espesor deseado. Si la cola ya estuviese muy seca, el alcohol era regado nuevamente, y las fibras eran nuevamente enarenadas.

El conjunto era mantenido en una estufa a 60°C por 30 minutos para acelerar el secado de la cola. La placa monolítica de fibras podía entonces ser retirada (fig. 4).

Fueron ensayadas placas con fibras de 10 y 20 cm de largo con una área transversal media (de 50 especímenes) de $1,4 \text{ mm}^2$, o sea, las fibras tenían un lado medio de 1,18 mm. Fué usada, para el enarenado, la arena comercialmente conocida como arena fina.

Para la matriz fueron usadas natas de cemento puzolámico

y cemento portland común, ambos con resistencia de 3136 N/cm^2 y mortero de cemento y arena en las relaciones 1:1 y 1:2. La relación agua-cemento fué de 0,5 en peso. En las primeras experiencias fué usado el cloruro de calcio, en la proporción de 2% del peso del cemento, para acelerar la cura, pero el resultado fué muy malo. De alguna forma, el cloruro ha reaccionado o desprendido materia orgánica del bambú o de la cola, inhibiendo las reacciones del cemento en las áreas cercanas de las fibras.

Para acelerar la cura, las placas fueron llevadas, después de 24 horas, a la estufa, donde permanecieron por dos días.

En todos los casos, las fibras correspondían a 10% del peso total de las placas.

2.3. Resultados de los ensayos a flexión de las placas.

Las placas fueron ensayadas a flexión, biapoyadas, con distancia de 30 cm entre apoyos y carga lineal estática en el centro del vano (fig. 5). Los resultados (tabla 5) demuestran que el bambú-cemento puede presentar excelentes propiedades estructurales, comparables a las del asbestos-cemento⁸, que necesitaría de una placa de 7 mm de espesor para resistir al mismo esfuerzo, con las mismas condiciones de carga.

Es posible notar que los resultados de los ensayos de las placas donde fué empleada nata de cemento fueran los mejores. Además, las placas con fibra de 20 cm de largo presentaron mejores resultados que las de 10 cm, debido a la mayor área de adherencia, lo que redujo el porcentaje de fibras deslizadas de la matriz.

3.0. Viabilidad económica del bambú-cemento.

La viabilidad económica del material propuesto se refiere a la comparación de su precio con el precio de las chapas de asbestos-cemento. El costo de los materiales es como sigue: Bambú -no tiene un costo comercial, pues puede ser obtenido sencillamente en la región; cemento -Cr \$22,40/Kg; arena -Cr \$

1,00/Kg; cola -Cr \$500,00/Kg; alcohol -Cr \$90,00/Kg. Para la ejecución de una placa ondulada de $1,0 \text{ m}^2$ y 1,0 cm de espesor, el costo aproximado es de Cr \$280,00. En comparación con una placa de cemento-amianto de 8 mm, la cual cuesta en el comercio Cr \$120,00, el bambú-cemento presenta una reducción de 76% en el costo, si fueron considerados solamente el costo de los materiales. El costo del equipo (Cr \$30.000,00) será mínimo de Cr \$1,00 por chapa, desde que sea utilizado por una gran cantidad de familias (alrededor de 1000). La mano de obra no fué computada, pues se considera la producción de los elementos del habitat por los propios usuarios. El costo de la energía eléctrica es también despreciable.

4.0. Conclusiones.

En este trabajo hemos descrito el desarrollo del material bambú-cemento. Los ensayos ya hechos demuestran que tiene buenas posibilidades de empleo, en sustitución al asbestos-cemento. Sin embargo, es necesario observar que las posibilidades técnicas no fueron totalmente aprovechadas, habiendo aún la necesidad de optimización del volumen y dimensiones de las fibras, la composición de la matriz y el tipo de cola a ser usada. Tales estudios, creemos, llevarán a resultados aún mejores.

Con el desarrollo del material será posible el estudio de su utilización en la fabricación de los elementos constructivos descritos en el comienzo de este trabajo. Tal fabricación podrá darse a través de esfuerzos de autoconstrucción, debido a la sencillez de los equipos y de las técnicas constructivas.