

Mortero reforzado con fibras de polipropileno

Resistencia a flexión y compresión

Gladys Maggi Villarroel

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de un programa experimental de ensayos realizados para evaluar el comportamiento del mortero reforzado con fibras de polipropileno bajo cargas de flexión y compresión. La variable fundamental corresponde al porcentaje de volumen de fibras incorporado a la matriz de cemento, para lo cual se adoptaron valores inferiores al uno por ciento.

Los ensayos permiten evaluar las propiedades elásticas y mecánicas del mortero reforzado con fibras, entre ellas, trabajabilidad basada en el asentamiento, peso unitario del concreto fresco, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, tenacidad. Los resultados reflejan un incremento de la resistencia a flexión y de la capacidad de absorción de energía del mortero, en función del aumento del porcentaje de fibras de polipropileno.

Abstract

The objective of this work is to present the results of one experimental program essays made to evaluate the behavior of the polypropylene fibers reinforced cement composites down compression and flexion charges. The fundamental variate corresponds to the fiber volume percentage incorporated to the cement mixture, to which were used values under the one percent. The essays permit to evaluate the mechanical and elastic properties of the fibers reinforced cement composites, between them, workability based on the assessment, fresh concrete unitary price, flexion resistance, compression resistance, elasticity module, tenacity. The results shows an increase in the flexion resistance and in the concrete energy absorption capacity, in function of the polypropylene fibers increase percentage.

Introducción

La utilización de las fibras plásticas como refuerzo del concreto constituye una de las vías para prolongar la durabilidad de las obras realizadas con este material compuesto. Entre los principales factores que controlan su comportamiento, podemos mencionar las propiedades físicas de las fibras y de la matriz, así como la resistencia de unión entre ellas. Asimismo, la capacidad de la fibra para actuar como refuerzo dependerá del grado en que los esfuerzos son transmitidos a través de la matriz, y a su vez, este grado de transferencia estará gobernado por las características propias de las fibras.

En el trabajo de investigación se plantea analizar el comportamiento del concreto reforzado con fibras plásticas de polipropileno, mediante la determinación de las características y propiedades de los materiales que en él intervienen así como de la caracterización de su resistencia ante diversas acciones.

El programa experimental de ensayos contempla:

- a. Caracterización de los materiales. Corresponde a la determinación de las características de todos los materiales que se utilizan en la elaboración de las probetas a ser sometidas a ensayos de laboratorio: cemento, agregados, fibras.
- b. Ensayos de mortero reforzado con fibras. Ensayos de resistencia a flexión y a compresión correspondiente a los 7, 14 y 28 días, incorporando porcentajes de fibras inferiores al 1%.

Descriptores:

Mortero reforzado con fibras;
Fibras de polipropileno;
Resistencia a la flexión;
Resistencia a la compresión.

Descriptors:

Fiber reinforced cement composites; Polypropylene fibers; Flexion resistance; Compression resistance.

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 17-1, 2001, pp. 43-50.
Recibido el 07/02/00 - Aceptado el 04/09/00

artículos

1. Caracterización de materiales

Los materiales a utilizar en la elaboración de las probetas son: cemento, arena natural, agua de chorro y fibras plásticas de polipropileno.

Cemento: Cemento Portland tipo I según norma COVENIN 28 (ASTM C 150). Homogeneización del insumo por cuanto los sacos comprados no son del mismo lote (misma empresa pero diferente fecha). El proceso se realiza mediante el mezclado de porciones iguales en cada volumen vertido en la máquina de desgaste Los Angeles, 100 vueltas. Posteriormente el cemento homogeneizado es guardado en bolsas plásticas y almacenado para evitar su dispersión.

Arena natural: Los agregados comerciales son analizados granulométricamente en sus condiciones iniciales, y se decide su procesamiento en el laboratorio. Se procede al lavado y tamizado de la arena para eliminar el exceso de finos y las impurezas orgánicas presentes. Secado al sol por 24 a 48 horas para lograr la condición seca al aire. Un segundo análisis granulométrico indica la necesidad de descomponer el agregado lavado en tres fracciones, para luego recomponerlas a fin de obtener la curva promedio establecida en la norma COVENIN 277.

Los resultados de la caracterización del agregado son: peso unitario suelto 1.576 kg/m^3 , peso unitario compacto 1.802 kg/m^3 , peso específico aparente 2.650 Kg/m^3 . La distribución y ajustes del agregado preparado se indican en las tablas 1 y 2.

Tabla 1:
Ajuste del agregado preparado

Cedazo	Peso (g)	Porcentaje
mayor # 4	40	8
# 4 - # 16	185	37
Menor # 16	275	55
	500	

Tabla 2:
Distribución del agregado preparado

Número	Cedazo (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje pasante
# 4	4,75	37	7,6	7,6	92,4
# 8	2,36	103	21,2	28,8	71,2
# 16	1,18	67	13,8	42,6	57,4
# 30	0,60	94	19,4	62,0	38,0
# 50	0,30	80	16,5	78,5	21,5
# 100	0,15	70	14,4	92,9	7,1
# 200	0,075	23	4,7	97,6	2,4
Faltante		11	2,3	99,9	0,1
		485			

Fibras de polipropileno: Presentan forma de red que al ser abiertas muestran una estructura reticular característica de su proceso de producción. Su longitud varía entre 22 y 42 mm. Peso específico: 910 kg/m^3 . Peso unitario: $49,5 \text{ kg/m}^3$. Disponibles en paquetes de 500 g. La caracterización de las fibras de polipropileno según norma española UNE 83-500-89/2 es: clasificación tipo II, láminas fibriladas. El enlace de las fibras con la matriz de cemento es mediante una interacción mecánica, no enlace químico. La adición de fibras a la mezcla se realiza por peso. Los porcentajes de fibra seleccionados para la evaluación son 0,10 - 0,25 - 0,50 y 0,75 en porcentaje de volumen.

2. Morteros reforzados con fibras de polipropileno

Se elabora un plan de trabajo para la preparación de las probetas y ejecución de los ensayos para edades del concreto de 7, 14 y 28 días. Esto permite evaluar las propiedades elásticas y mecánicas del mortero reforzado con fibras: trabajabilidad basada en el asentamiento, peso unitario del concreto fresco, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad.

2.1. Diseño de mezcla y preparación de probetas

Proporciones de la mezcla utilizada para la matriz de mortero se indican en la tabla 3.

La cantidad de materiales requeridos para cada una de las mezclas corresponde a los siguientes datos:

Volumen de mezcla: 53 l	Fracción volumen fibras:
Cemento: 27 Kg	91 g/m^3 (0,10%)
Agua: 15,5 l	118 g/m^3 (0,25%)
Relación agua / cemento = 0,57	233 g/m^3 (0,50%)
Agregado fino (arena): 75 Kg	355 g/m^3 (0,75%)

El mezclado y preparación del mortero correspondiente a una misma mezcla se realiza en una sola batida para evitar incorporar variables o condicionantes adicionales relacionadas con la manipulación y dosificación de los materiales, preparación y vaciado de la mezcla. Probetas elaboradas para los ensayos son: cubos estándar de 50,8 mm (2 pulg.) de arista para ensayos a compresión y viguetas de 100 x 100 x 400 mm (4 x 4 x 15,5 pulg.) para ensayos a flexión.

Secuencia y tiempo del proceso de mezclado:

- Incorporación en la mezcladora de 7,0 l de agua a fin de humedecer las paredes, paletas y fondo de la misma.
- Incorporación del agregado fino y mezcla durante un minuto.
- Incorporación de 6,5 l de agua y mezclado durante un minuto, para permitir la absorción del agua por parte de la arena.
- Incorporación del cemento.
- Incorporación del resto del agua y mezclado durante un minuto.

- Incorporación de las fibras y mezclado durante tres minutos.
- Descanso durante tres minutos y nuevamente es mezclado durante tres minutos.
- Medición de la trabajabilidad de la mezcla. Para algunas de las mezclas, previo a la incorporación de las fibras, también se mide el asentamiento para evaluar la diferencia en la trabajabilidad.
- Vaciado de la mezcla en las probetas. El vaciado de las viguetas se realiza por capas, con vibrado manual.

Las probetas son guardadas en sus moldes por 24 horas. Posteriormente desmoldadas y curadas manteniendo 100% de humedad relativa y a temperatura de 23 °C (72 °F) durante 27 días.

2.2. Ensayos de mortero fresco

Una vez concluido el proceso de mezclado se realizan las medidas del asentamiento y masa volumétrica, para posteriormente obtener las otras características físicas de las mezclas, las cuales se resumen en la tabla 4.

Tabla 3:
Características de la mezcla de mortero

Descripción	Cantidad		
	En peso	En volumen absoluto (**)	Mortero equivalente
Contenido de cemento (kg/m ³)	500	0,158	544
Contenido de arena (kg/m ³) (*)	1.375	0,518	1.497
Agua (l)	242	0,242	263
	2.117	0,918	2.304
Relación agua/cemento:	0,48		
Peso específico fibra polipropileno: g/dm ³	910		
Fracción volumen fibra: kg/m ³ (%)	47	(0,10)	
	117,5	(0,25)	
	235	(0,50)	
	352	(0,75)	
Resistencia especificada: kg/cm ²	250		

(*) Agregados, condición saturada con superficie seca, SSS

(**) Condición de volumen: suma de volúmenes absolutos igual a volumen referencial, que generalmente es de un metro cúbico.

Tabla 4:
Características de las mezclas

Descripción	Unidad	Porcentaje de fibra en mezcla				Observaciones	
		Patrón	0,10 %	0,25 %	0,50 %		0,75 %
Asentamiento							
- Mezcla sin fibras	cm	7	7	7	8	7	Asentamiento con el cono de Abrams (*)
- Mezcla con fibras	cm				5	5	
Peso volumétrico	Kg		5.400	6.400	5.400	6.200	Medida con el cilindro
Volumen	m ³		2.840	2.240	2.474	2.840	
Peso unitario	Kg/m ³	2.254	2.200	2.253	2.182	2.183	
Volumen real	dm ³	52,15	52,01	52,14	54,0	53,97	
Contenido cemento	Kg	519	519	512	500	500	

(*) Según COVENIN 339

artículos

Las mezclas de mortero reflejan una pérdida de asentamiento cuando se agregan las fibras, la cual es incrementada por el aumento del porcentaje de fibra añadido a la mezcla. Sin embargo, esta pérdida de asentamiento no necesariamente significa que hay una pérdida en la trabajabilidad de la mezcla, al menos para porcentajes bajos de fibra (menores al 1% por volumen) como los utilizados.

El mortero fresco reforzado con fibras de polipropileno no presenta sangrado de superficie y no se observa segregación en la mezcla.

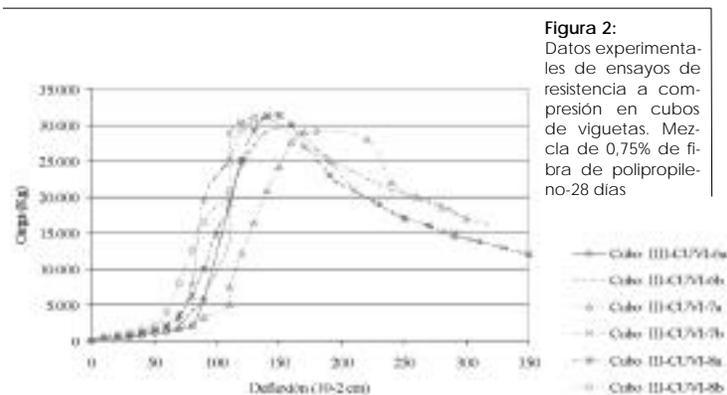
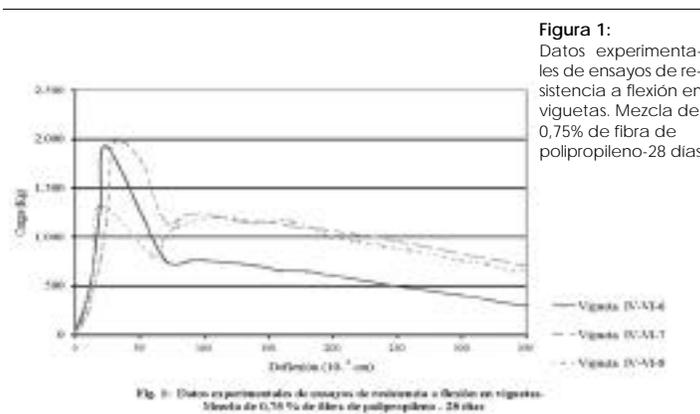
2.3. Ensayos de mortero endurecido

Los ensayos realizados para determinar las propiedades mecánicas del mortero reforzado con fibras son:

- Ensayos de flexión en viguetas. Ensayos con carga en el tercio medio (según norma ASTM C 78), para determinar la resistencia a flexión del mortero en función de la variación del porcentaje de fibras. Ensayos realizados a los 7, 14 y 28 días, para un total de cuarenta y cinco (45) probetas. En cada uno de ellos se realizan las mediciones de: carga aplicada y deflexión en el punto medio de la vigueta, carga de rotura. La aplicación de carga se realiza hasta valores superiores a la deformación de rotura.
- Ensayos de compresión en probetas cúbicas tomadas de viguetas. Determinación de la resistencia a compresión del mortero (según norma ASTM C 116) en función de la variación del porcentaje de fibras. Para los ensayos se utilizan los cubos tomados de las cabezas de las viguetas, y son realizados a los 7, 14 y 28 días, para un total de ochenta (80) probetas. Para cada uno de ellos se realiza la medición de: carga aplicada y su deformación, carga de rotura.

- Ensayos de compresión en cubos estándar. Determinación de la resistencia a compresión del mortero utilizando cubos estándar. Ensayos realizados a los 7, 14 y 28 días, para un total de cincuenta probetas. Para cada uno de los cuales se realiza la medición de la carga máxima.

Con los resultados de los ensayos de flexión de viguetas se elaboran las curvas carga-deflexión para cada una de las mezclas, y con los resultados de los ensayos de resistencia a compresión se elaboran las curvas carga-deformación para cada una de las mezclas (Maggi, 1999b). En las figuras 1 y 2 se muestran ejemplos de ellas.



En el momento que se inicia la fisuración en la zona traccionada de la vigueta sometida a flexión, se puede asumir que comienzan a trabajar las fibras y continúan haciéndolo hasta que la vigueta se rompe por tracción o por deslizamiento de las fibras debido a la pérdida de adherencia.

En la formación de las caras de fractura, éstas permanecen unidas por fibras con orientación aleatoria, que han resistido el esfuerzo de fractura (figura 3). Esto conduce a que la falla en las viguetas no sea frágil como en la mezcla patrón sino que se refleja un cierto comportamiento dúctil que aumenta con el incremento del porcentaje de fibra (comportamiento plástico).

Al examinar las curvas carga-deflexión se observa que la primera fisuración ocurre a cargas similares en las diferentes mezclas (patrón y con porcentaje de fibra).



Figura 3:
Cocido entre las dos partes de la viga fracturada

3. Determinación de las propiedades mecánicas

En esta sección se analizan los resultados de los ensayos del mortero endurecido correspondientes a absorción, flexión en viguetas, compresión en probetas cúbicas tomadas de viguetas y compresión en cubos estándar, para determinar las propiedades mecánicas del mortero reforzado con fibras.

A partir del análisis de las curvas carga-deflexión de los ensayos de flexión, se determina el módulo de rigidez, módulo de ruptura (límite elástico) e índice de tenacidad. Y del análisis de las curvas carga-deformación de los ensayos de compresión, se determina la resistencia y el módulo de elasticidad a compresión.

3.1. Absorción

Sobre la base de los resultados experimentales se determina la absorción del mortero (según norma ASTM 642) para los diferentes porcentajes de fibra en función del tiempo (figura 4). Posteriormente se determina la variación de la absorción del mortero en función del porcentaje de fibra (figura 5). Se indican las curvas de tendencia lineal y polinómica, ambas reflejan un incremento progresivo de la absorción en función del porcentaje de fibra.

3.2. Módulo de rigidez a flexión

El límite elástico se define como la carga bajo la cual el comportamiento del mortero es elástico. Por debajo de este límite podemos desprestigiar la influencia de la posible fisuración de la matriz de mortero y

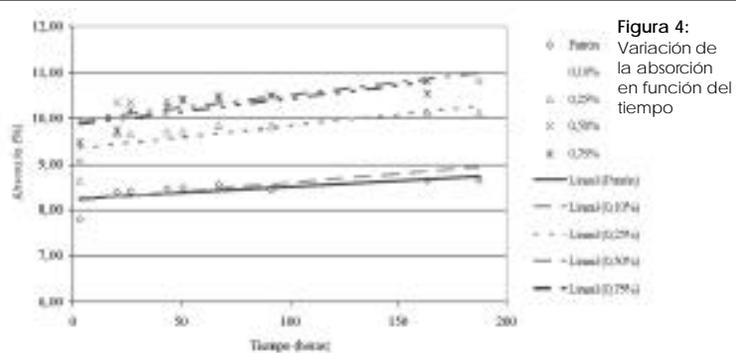


Figura 4:
Variación de la absorción en función del tiempo

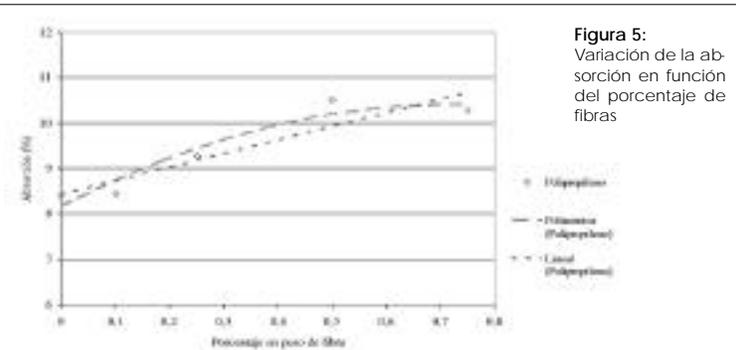


Figura 5:
Variación de la absorción en función del porcentaje de fibras

asimismo considerar el límite elástico como el punto en que aparece la primera grieta.

De todos los gráficos de resistencia a flexión de viguetas carga-deflexión se elaboran los cálculos correspondientes para la determinación de la pendiente de la zona elástica. En la figura 6 se evidencia el comportamiento del módulo de rigidez obtenido para las diferentes edades y los porcentajes de fibras del mortero.

La variación del módulo de rigidez es poca, lo que evidencia la reducida influencia de las fibras sobre su comportamiento.

artículos

3.3. Módulo de ruptura

La determinación del módulo de ruptura se realiza utilizando el procedimiento establecido por ASTM C 78, con 3 cilindros para cada variable. La fisura inicial en la superficie de tensión de las viguetas se obtiene en el tercio medio de la longitud de apoyo, de allí que el cálculo del módulo de ruptura se realiza por la expresión: $R = \frac{P}{b \cdot d^2}$. En la figura 7 se indica los resultados correspondientes al módulo de ruptura en función de la edad.

Para el contenido de 0,10% por volumen de fibra se observa un pequeño incremento en módulo de ruptura a flexión a los 28 días, respecto a la mezcla patrón. Sin embargo el módulo de ruptura para 7 y 28 días fue ligeramente menor para mortero con contenido de 0,50 a 0,75% de volumen de fibras, en comparación con la mezcla patrón. Pareciera no haber consecuencia acerca de los efectos significativos al añadir fibra de polipropileno sobre la resistencia a la primera fisura, o módulo de ruptura.

3.4. Índice de tenacidad

Ensayo de tenacidad a flexión (según norma ASTM 1018) utilizando viguetas con carga en el tercio medio. En él se determina la deflexión en el punto de la viga donde ocurre la primera grieta.

El índice de tenacidad es una medida de la capacidad de absorción de energía del mortero. El área bajo la curva es proporcional a la cantidad de energía absorbida antes de la rotura; ésta nos puede dar una

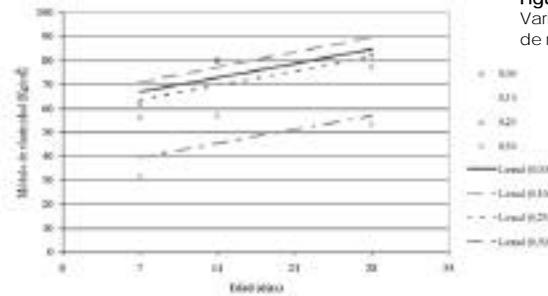


Figura 6:
Variación del módulo de rigidez a flexión

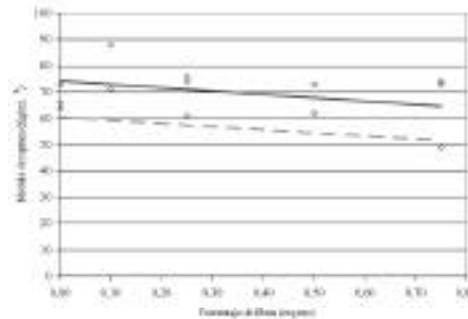


Figura 7:
Variación del módulo de ruptura

idea de la tenacidad de este tipo de mortero. En la tabla 5 se indica la variación de la tenacidad para los diferentes porcentajes de fibra.

3.5. Patrón de falla a compresión

Agregar fibras de polipropileno al mortero tiene un efecto significativo en el modo y mecanismo de falla de los cubos en el ensayo a compresión. El mortero con fibras falla de un modo más dúctil. Mientras que el cubo de mortero en la muestra patrón se fragmenta debi-

Tabla 5:
Tenacidad

Edad de probeta	7 días				28 días			
	0,10	0,25	0,50	0,75	0,10	0,25	0,50	0,75
Deflexión a primera grieta (mm):	0,26	0,52	0,52	0,42	0,33	0,30	0,33	0,25
Tenacidad a primera grieta (Kg.mm)	202	191	375	294	318	272	296	221
Deflexión para 3	0,78	1,57	1,56	1,25	0,96	0,90	1,00	0,75
Deflexión para 5,5	1,43	2,88	2,86	2,29	1,83	1,65	1,83	1,38
Deflexión para 15,5	4,03	8,11	8,06	6,46	5,17	4,65	5,17	3,88
Tenacidad para 3	445	958	1.030	1.177	1.293	1.101	1.064	786
Tenacidad para 5,5	508	-	1.572	1.952	1.213	1.771	1.692	1.409
Tenacidad para 15,5	769	-	-	4.374	-	-	-	3.070
I_5	2.61	-	2.86	3.95	3.45	4.21	3.67	3.70
I_{10}	1.72	-	4.27	6.52	-	6.96	5.82	6.64

do a la incapacidad de absorber energía; los cubos de mortero con fibra continua manteniendo la carga y resiste deformaciones, quebrándose en piezas.

3.6. Resistencia a compresión

Con los resultados de los ensayos a compresión en cubos de viguetas y los cubos estándar se determinan los valores de la carga máxima obtenida para cada probeta y se calcula la resistencia a compresión correspondiente, valores que se indican en las figuras 8 y 9.

De los valores experimentales obtenidos puede establecerse que al agregar fibras de polipropileno en cantidades inferiores al 0,75% existen pequeñas diferencias en la resistencia a la compresión. Sin embargo estas diferencias parecieran no ser representativas, y podría plantearse que son más bien efecto de la variación en el contenido de aire del mortero endurecido y de la diferencia en sus pesos unitarios, promedio por edad y/o dispersión en cada grupo.

3.7. Módulo de elasticidad a compresión

Con base en la información de los gráficos de resistencia a compresión de cubos carga-deformación, se elaboran los cálculos correspondientes para la determinación de la pendiente de la zona elástica. En la figura 10 se indica el valor del módulo de elasticidad obtenido para las diferentes edades y los porcentajes de fibras del mortero.

El módulo de elasticidad del mortero reforzado con fibras de polipropileno, no varía sustancialmente con el aumento del porcentaje de fibras.

4. Resultados

Del proceso experimental realizado sobre las muestras preparadas de mortero reforzado con fibras de polipropileno, y tomando como variable fundamental la variación del porcentaje de fibra en peso incorporado a la mezcla, se realiza el análisis de los resultados obtenidos; algunos de los aspectos más relevantes se presentan seguidamente.

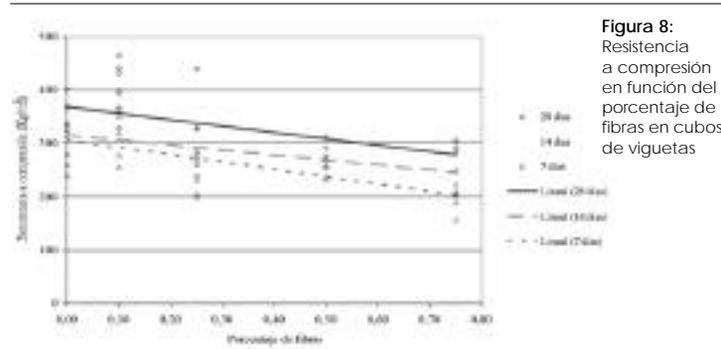


Figura 8: Resistencia a compresión en función del porcentaje de fibras en cubos de viguetas

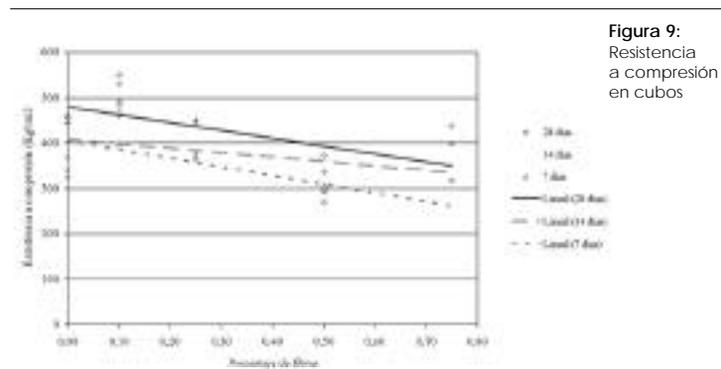


Figura 9: Resistencia a compresión en cubos

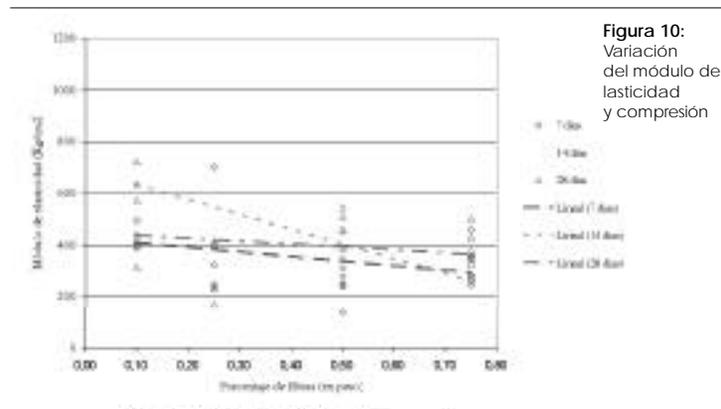


Figura 10: Variación del módulo de elasticidad y compresión

- * Para las cantidades de fibra utilizadas en la preparación de las mezclas (menores al 1%), no se observó ningún tipo de problemas con relación a la formación de grumos o incorrecta dispersión de las fibras. La distribución de fibras dentro de la mezcla es aleatoria.
- * La evaluación del comportamiento de la mezcla para los porcentajes

artículos

mayores permite evidenciar una ligera reducción de la trabajabilidad de la misma. No obstante, no es necesario tomar precauciones diferentes a las consideradas en el concreto normal en los procesos de preparado y vaciado de la mezcla de cemento.

- * Las caras de fractura formadas en los ensayos de flexión del mortero reforzado con fibras de polipropileno, permanecen unidas por fibras con orientación aleatoria, que han resistido el esfuerzo de fractura. Esto conduce a que la falla en las viguetas no sea frágil, como en la mezcla patrón, sino que se refleja un cierto comportamiento dúctil que aumenta con el incremento del porcentaje de fibra (comportamiento plástico).
- * La resistencia a flexión del mortero reforzado con fibras de polipropileno se incrementa con el aumento del porcentaje de fibras de polipropileno.
- * Los módulos de rigidez a flexión y de

elasticidad a compresión del mortero reforzado con fibras de polipropileno, no varían sustancialmente con el aumento del porcentaje de fibras.

- * Pareciera no haber consecuencia acerca de los efectos significativos en el módulo de ruptura al añadir fibra de polipropileno a la mezcla.
- * De los valores experimentales obtenidos en los ensayos a compresión puede establecerse que la incorporación a la matriz de mortero de porcentajes de fibras de polipropileno inferiores al 1%, reflejan pequeñas diferencias en la resistencia a la compresión del mortero. Sin embargo estas diferencias parecieran no ser representativas, y podría plantearse que son más bien efecto de la variación en el contenido de aire del mortero endurecido y de la diferencia en sus pesos unitarios.

Bibliografía

ACI COMMITTEE 544.1R-96. 1996. "Fiber Reinforced Concrete". American Concrete Institute.

ASTM. Designation: C 1018-89. 1989. "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)".

ALLAN M.L. and KUKACKA L.E., 1995. "Strength and durability of polypropylene fibre reinforced grouts". *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n° 3, pp. 511-521.

BAYASI, Ziad and ZENG Jack. 1993. "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete". *ACI Material Journal*, november-december, vol. 90, n° 6, pp. 605-610.

BENTES, Ruy y ENGLER de VASCONCELLOS, Luis. 1993. "O reforço das fibras". *Téchne*, Revista de Tecnologia da Construção, mar-abr, año 1, pp. 28-30.

MAGGI, Gladys. 1998. "Trabajabilidad de la pasta de cemento reforzada con fibras plásticas", *XVII Jornadas de Investigación*, IDEC-FAU-UCV. Noviembre.

1999a. "Evaluación de la capacidad resistente en morteros reforzados con fibras plásticas". Informe final presentado al organismo financiador del proyecto, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, UCV. Agosto.

1999b. "Ensayos de Laboratorio en pastas de cemento reforzada con fibras plásticas". *Revista Tecnología y Construcción*, IDEC-FAU-UCV, vol. 15-I, 1999.

NANNI, Antonio. 1993. "Fiber-reinforced plastic (FRC) reinforcement for concrete structures. Properties and applications". Elsevier Science Ltd., august.

SEGRE, N.; TONELLA, E. and JOEKES, I. 1998. "Evaluation of the stability of polypropylene fibers in environments aggressive to cement-based materials". *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n° 1, pp. 75-81.

STEVENS, D. J. 1995. "Testing of fiber reinforced concrete". American Concrete Institute, june.

Agradecimiento

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, por el financiamiento y apoyo para la realización de esta investigación (Proyecto de investigación N° 02.32.414/98).