

INCLUSIÓN DE FIBRAS DE CAUCHO PARA MEJORAR LA DURABILIDAD EN HORMIGONES

Benjamín López Kuchudis¹, Rodrigo Isas Pedraza², Silvia Palazzi³

^{1,2,3}Laboratorio de Ensayo de Materiales. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán - S.M. de Tucumán – Argentina.

¹ benjalk.93@gmail.com, ² disaspedraza@herrera.unt.edu.ar, ³ spalazzi@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

La inclusión de residuos provenientes de actividades industriales como componentes de materiales para la construcción es estudiada con éxito desde hace algunos años. La utilización de fibras de caucho provenientes del recapado de neumáticos (FRN) en hormigones evidenció que incorporando hasta 40 kg de estas fibras por m³ de hormigón se mantienen las resistencias del hormigón patrón sin fibras, y si bien es cierto no se comportan como fibras estructurales, mejoran los valores de permeabilidad y succión capilar. Este efecto de tapón de los capilares sugiere su estudio como mecanismo efectivo para mejorar la durabilidad de los hormigones expuestos a distintos ambientes agresivos contemplados en el Reglamento CIRSOC 201- 2005, sin por ello tener que aumentar la resistencia característica más allá de la necesaria por razones de carga. Los resultados obtenidos nos ponen frente a un nuevo material ecológico, que puede lograr la impermeabilidad requerida en innumerables obras civiles.

Palabras claves: residuos industriales, fibras de recapado de neumáticos, durabilidad, hormigón.

INTRODUCCIÓN

El recapado o recauchutado de neumáticos es un proceso mediante el cual se reconstruye la banda de rodadura de todo tipo de neumáticos, principalmente de los de vehículos de gran porte (camiones y colectivos). Se ha demostrado en los últimos años que a través del recauchutado se pueden alcanzar ahorros de entre un 50 % y un 75 % en el consumo de energía y materias primas, así como en las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Esto también tiene una repercusión en la economía de los usuarios. Este proceso genera residuos, fibras del recapado de neumáticos (F.R.N.), las cuales son reutilizadas en la región particularmente como material de amortiguamiento en las canchas de césped sintético de diversos deportes.

En el marco de la investigación de materiales constructivos innovadores, con un criterio ambiental fuertemente difundido se planteó llevar a cabo este proyecto. Se busca estudiar los fenómenos que involucra la inclusión de 40 kg/m³ de este residuo en el hormigón y cómo repercute en la durabilidad de los mismos.

El desarrollo de este proyecto de investigación consta de dos etapas bien definidas. La primera consiste en la tarea de recopilación de información, entendimiento de los fenómenos que ocurren en el hormigón, con y sin la inclusión de las fibras, y elaboración de un marco teórico que justifique su empleo. Mientras que la segunda etapa consiste de

la fase experimental de vital importancia para este tipo de proyectos, describiendo en esencia este novedoso material y su comportamiento.

DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

En la mayoría de los reglamentos internacionales sobre estructuras de hormigón armado, hasta hace algunos años se instruía el diseño de las mismas exclusivamente por resistencia mecánica debido a cargas, siendo las cuestiones de durabilidad menospreciadas. Hace alrededor de 40 años, se habían registrado deterioros prematuros de las construcciones, mucho antes de lo previsto por el diseño, para una dada vida útil. Tampoco existía una mirada única de la problemática por parte de los principales actores en el diseño de las estructuras (proyectistas y técnicos del hormigón), lo que llevó a empeorar la situación. Esto produjo que se vislumbrara un cambio de paradigma dándole mayor importancia a la “durabilidad” a partir de la necesidad misma de mantener o incrementar la vida de las estructuras en servicio [1].

Cuando se habla de “Vida Útil” se está haciendo referencia al periodo de tiempo en el cual una estructura debe ser capaz de desempeñar las funciones (en servicio) para la que fue diseñada. Dependiendo de la envergadura de la obra y las exigencias dispuestas por el reglamento vigente, la mayoría de las obras que emplean el hormigón como su material de construcción se diseñan para una vida útil de 50 años [2].

El reglamento ACI define la durabilidad del hormigón como:

*“...la habilidad para resistir la acción de la **intemperie**, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, **que produzca deterioro del hormigón.**”*

Generalmente la durabilidad del hormigón ha estado vinculada con su resistencia a la compresión. Sin embargo, esta no es la única propiedad involucrada ya que existen otros aspectos a tener en cuenta para obtener un hormigón “durable” como por ejemplo el medio ambiente al que se expone y las condiciones de trabajo impuestas. Lo que lleva a que no existe un único hormigón durable para la generalidad de los proyectos debido a que los parámetros físicos, químicos y mecánicos de la zona de emplazamiento seguramente variarán de proyecto en proyecto. Por otro lado, cada situación de exposición que tendrá la estructura amerita una especificación particular tanto para los materiales como para el diseño de la mezcla, la técnica de producción y el proceso constructivo, por lo que es imposible generalizar.

El reglamento CIRSOC 201, 2005 establece especificaciones para tener en cuenta a la hora de diseñar una mezcla de hormigón por razones de durabilidad según el tipo de exposición que tendrá la estructura (ver Tabla 1), pero además, exige para aquellas estructuras destinadas a contener o conducir agua y que requieran elevada impermeabilidad, una penetración de agua máxima igual o menor que 50 mm o 30 mm, según el caso, en el ensayo según norma IRAM 1554-1983.

Tabla 1: Requisitos de durabilidad para el diseño de hormigones según la exposición [3].

Requisitos	Tipos de exposición de las estructuras, de acuerdo con la clasificación de las Tablas 2.1. y 2.2. y sus complementarias 2.3. y 2.4.									
	A 1	A 2	A 3 y M 1	C L y M 2	M 3	C 1 ⁽²⁾	C 2 ⁽²⁾	Q 1	Q 2	Q 3 ⁽³⁾
a) Razón a/c máxima ⁽¹⁾										
Hormigón simple	----	----	----	0,45	0,45	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón armado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón pretensado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
b) $f_{c\ min}$ (MPa)										
Hormigón simple	----	----	----	30	35	30	35	30	35	40
Hormigón armado	20	25	30	35	40	30	35	30	35	40
Hormigón pretensado	25	30	35	40	45	30	35	35	40	45
Penetración de agua o succión capilar según 2.2.11.	no	si	si	si	si	si	si	si	si	si

Otro requisito para los hormigones de las estructuras sometidas a las clases de exposiciones A2, A3, CL, M1, M2, M3, C1, C2, Q1, Q2 y Q3 es que deben tener una velocidad de succión capilar igual o menor que $4,0 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{1/2}$ de muestras ensayadas según norma IRAM 1871.

El hormigón es un material que al encontrarse en estado endurecido presenta vacíos (porosidad). Su estructura está conformada por agregados, pasta y aire. Este último puede haber sido intencionalmente incorporado durante la mezcla para mejorar la durabilidad por prescripción del reglamento, o naturalmente, dependiendo su proporción del tamaño máximo del agregado. Generalmente el aire intencionalmente incorporado está presente formando poros que no están conectados entre sí, sin influencia alguna en los mecanismos de transporte de fluidos. La transferencia de materia en medios porosos y sus propiedades dependen no tan sólo de la presencia de poros y su tamaño, sino que de cuanto mayor o menor conectividad presenten [4]. Idealizando la situación para un mejor entendimiento, se plantea un esquema constituido por tubos de diferentes diámetros. Si estos están bloqueados, no tendrán posibilidad de transporte (efecto tapón). Si se comparan tubos de gran diámetro con tubos de menor diámetro, tendrán mayor capacidad de transporte los tubos de mayor diámetro. Los procesos típicos de transporte que interesan son el transporte de agua bajo presión hidrostática y el transporte de agua por absorción capilar, además de la difusión de iones bajo gradientes de concentración y el transporte de iones en el agua.

Existen varios parámetros del hormigón en cuanto a su diseño, que influyen en su permeabilidad y difusividad. La relación agua / cemento (a/c) es uno de estos y tiene una relación directa con la porosidad y conectividad de los poros.

También se generan poros a partir de los procesos de mezclado y compactación o incluso los ocasionados como consecuencia del fenómeno de exudación, por nombrar otros orígenes. El curado del hormigón también tiene influencia en la durabilidad del mismo, ya que, si se busca un eficiente bloqueo de los poros capilares, los granos de cemento deberán estar bien hidratados, controlando la humedad y temperatura del curado. La infinidad de causas que producen una permeabilidad excesiva dificultan su control, y tornan importante la evaluación de la estructura de poros que posee un hormigón cuando nos referimos a su durabilidad. Se lo debe asociar a los parámetros relacionados con los mecanismos de transporte.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para elaborar los hormigones se utilizaron los siguientes materiales de uso corriente en la ciudad de San Miguel de Tucumán:

Cemento Pórtland

Se utilizó cemento Pórtland compuesto **CPC 30** compuesto principalmente por clinker Pórtland más una combinación de adiciones minerales como escoria granulada de alto horno, “filler” calcáreo y puzolanas.

Agregados

Se utilizó agregado natural (fino y grueso) de una cantera ubicada en la margen derecha del río Salí (cuenca Salí-Dulce), en el departamento Tafi Viejo de la Provincia de Tucumán. Se llevó a cabo una caracterización de los mismos a través de un ensayo granulométrico (Figura 1), peso unitario, volumen de vacíos y peso específico (Tabla 2).

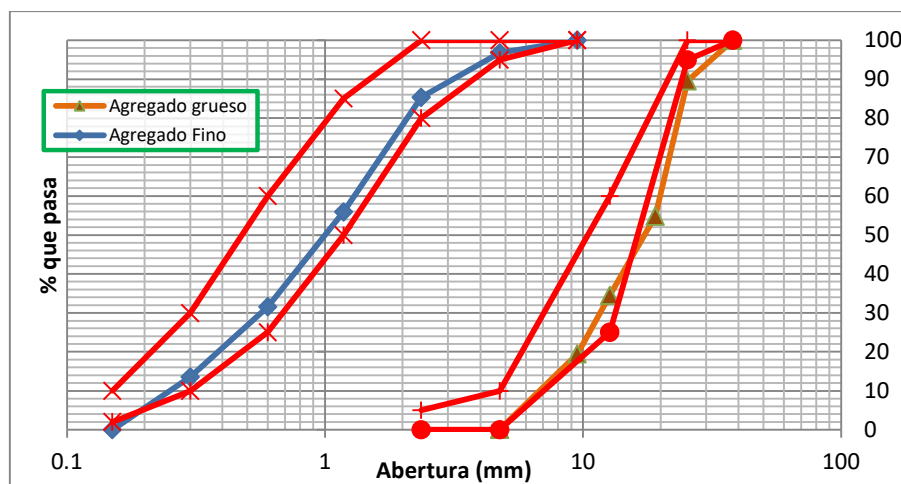


Figura 1: Curvas granulométricas del agregado fino y grueso. En rojo curvas límites.

Tabla 2: Características de los agregados empleados.

Materiales	Diám. Max. [mm]	Mód. finura	Absorción (%)	P. Unit. (kg/dm ³)	P. Esp. (g/cm ³)
Ag. Fino		3,17	2,16	1,692	2,632
Ag. Grueso	38		1,25	1,664	2,648

Fibras

- El proceso del recapado o recauchutado de neumáticos tiene como resultado un material de descarte, que recolectado da como origen a las F.R.N. Se optó por realizar un tamizado del producto con el fin de conocer los tamaños de las partículas presentes en la muestra ya que las curvas granulométricas eran muy variables de una muestra a otra. Las características geométricas de las fibras fueron medidas, obteniéndose los siguientes valores: Longitud (medida): variable, entre 25 mm a 0,15 mm.
- Diámetro (medido): variable, entre 1 mm y 0,15 mm.

La Figura 2 muestra la serie de tamices utilizados para conocer su distribución granulométrica

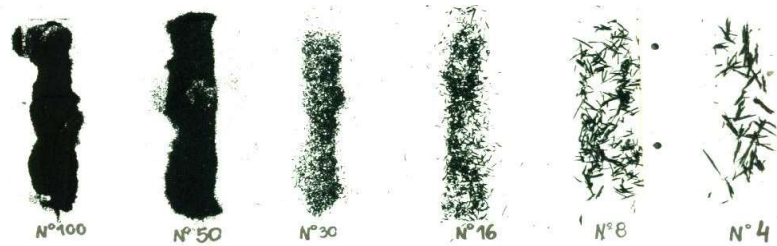


Figura 2: Distribución en tamaño de las F.R.N. empleadas en la dosificación.

Se elaboran tres hormigones patrones convencionales de diferentes relaciones agua cemento (a/c). Ellos son:

- **C1:** a/c = 0,50
- **C2:** a/c = 0,46
- **C3:** a/c = 0,42

Luego se incorpora 40 kg/m³ de fibras de caucho al hormigón con relación a/c=0,50:

C1 + 40: C1 + 40 kg/m³ de F.R.N.

Se ensayan los hormigones en estado fresco: asentamiento con cono de Abrams, contenido natural de aire incorporado con aparato Washington y peso unitario. En estado endurecido se ensayan a compresión simple, a tracción por compresión diametral, penetración de agua a presión y succión capilar sobre probetas cilíndricas curadas en cámara húmeda hasta la edad de 28 días siguiendo los lineamientos de las correspondientes normas IRAM.

Propiedades en estado fresco

Tabla 3: Resultado de ensayos en estado fresco.

Hormigón	Asent. [cm]	P.U. [kg/m ³]	Cont. Aire [%]
C1 (0,50)	8,00	2366,20	2,50
C1 + 40 F.R.N. (0,50)	1,25	2341,55	3,75
C2 (0,46)	7,75	2341,55	-
C3 (0,42)	6,75	2376,76	-

La inclusión de F.R.N. produce una marcada disminución del asentamiento. Esto se debe a que no se modifica el volumen de pasta del patrón "C1" y al agregarle las fibrillas, aumenta la superficie específica que la misma deberá recubrir. Las restantes mezclas, los pastones "C1", "C2" y "C3" (sin la inclusión de F.R.N.), presentan consistencias esperadas las cuales son asociadas a su diseño. Por otra parte, aumenta el contenido de aire y disminuye el peso unitario.

Propiedades en estado endurecido

Tabla 4: Resultado de ensayos en estado endurecido.

Hormigón	Resist. Compresión [MPa]	Resist. Tracción [MPa]	Penetración Agua a Presión		Velocidad de Succión Capilar [g/m ² /s ^{1/2}]
			Máxima [mm]	Promedio [mm]	
C1 (0,50)	23,36	2,56	52	42,71	12,22
C1 + 40 F.R.N. (0,50)	23,55	2,41	27	24,27	8,22
C2 (0,46)	27,46	3,08	38	29,48	11,60
C3 (0,42)	36,82	3,68	27	20,92	9,68

En la Tabla 4 se observa que a medida que disminuye la relación agua / cemento (a/c), la resistencia a compresión simple aumenta. En cuanto a la incorporación de las fibrillas en 40 Kg/m³, se verifica que no produce disminución de la resistencia a compresión.

La resistencia a la tracción por compresión diametral aumenta a medida que disminuye la relación agua / cemento (a/c). Se observa que la inclusión de las F.R.N. produce una reducción respecto al patrón "C1 (0,50)" del 6 %, valor poco significativo. Algo importante de remarcar es que tienen influencia en el tipo de rotura ocasionada a las probetas, dado que de las tres ensayadas de este patrón (C1 + 40 kg/m³), solo la primera fue posible romper en falla como cualquiera de las otras mezclas. Las otras dos una vez en falla, se fisuraron completamente pero no fue posible separarlas en su plano de rotura, ni siquiera ejerciendo fuerza posterior a su retiro del montaje del ensayo, como se ve en la Figura 3.



Figura 3: Falla de hormigón con F.R.N. en tracción indirecta.

En lo que respecta a penetración de agua se observa que el hormigón "C1" **NO CUMPLE** considerando el caso más restrictivo ya que la penetración media de agua a presión en el supera los 30 mm (ver Figura 4). En el caso de "C2" y "C3" **CUMPLEN** satisfactoriamente. "C1 + 40" **CUMPLE** satisfactoriamente, con un margen del 20 %.

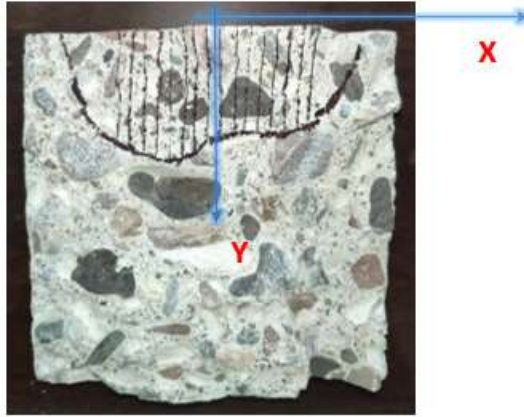


Figura 4: Perfil de penetración de agua, muestra C1 (0,50).

La inclusión de F.R.N disminuye efectivamente la profundidad de penetración del agua. El motivo de esto es la intercepción que provoca en los poros capilares del hormigón endurecido, produciendo un efecto tapón, ocluyendo y evitando la interconexión de los mismos. Esta mezcla si se la compara con el resto de los hormigones patones evidencia diferencias cuantificables en:

- C1+40 vs. C1: **44 % mejor** (menor penetración).
- C1+40 vs. C2: **18 % mejor** (menor penetración).
- C1+40 vs. C3: **16 % por encima** (mayor penetración).

Finalmente en lo que respecta a la velocidad de succión capilar (ver Figura 5), evidentemente la participación de las F.R.N. en la matriz del hormigón “C1 + 40”, en comparación con su homólogo (C1), cumple la función de bloquear los capilares que este posee en estado endurecido y en consecuencia reduce la succión capilar en:

- C1+40 vs. C1: **33 % mejor** (menor succión capilar).
- C1+40 vs. C2: **30 % mejor** (menor succión capilar).
- C1+40 vs. C3: **15 % mejor** (menor succión capilar).

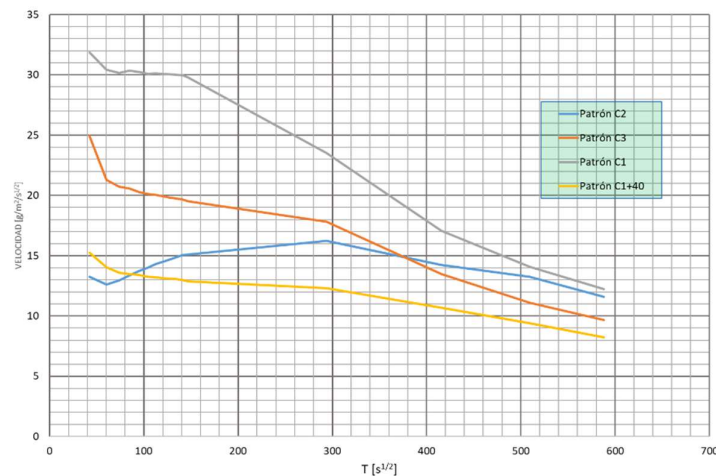


Figura 5: Gráfico de Velocidad de Succión Capilar obtenidos del ensayo.

“C1 + 40” ha superado en este aspecto incluso a la mezcla “C3”, que por su contenido de cemento de diseño debiera ser la más impermeable de los 4 hormigones. Esta mejoría resulta en un 15 % menos de agua absorbida por succión capilar. En cuanto a velocidad

de succión, las F.R.N. permiten a su vez obtener en la mezcla que las contiene menores velocidades con respecto a las otras mezclas.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se concluye que la inclusión de 40 kg/m³ de F.R.N. en hormigones convencionales permite mejorar las propiedades de durabilidad aquí estudiadas, y equipararlas o aumentarlas aún más respecto de hormigones con menores relaciones agua cemento que muchas veces se deben elegir a pesar de exceder las resistencias que les corresponde para soportar las cargas.

No menos importante es que se logran hormigones más durables y económicos con menores consumos de cemento, más ecológicos y amigables con el medio ambiente.

REFERENCIAS

- [1] Yugovich PG, "Vida útil de las estructuras - ¿Donde estamos y hacia donde vamos?". Buenos Aires: Facultad de Ciencias y Tecnología – UCA, (2011).
- [2] Irassar EF, "Durabilidad del Hormigón Estructural". Olavarría: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, (2001).
- [3] INTI. "CIRSOC 201 – Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", (2005).
- [4] Fernández Luco L, "Durabilidad del Hormigón Estructural - capítulo 1: la durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos". Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (2001), 1-43.
- [5] Klaric M, "Durabilidad del Hormigón Estructural - Fisuración y ataques físicos al hormigón", Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (2001), 47 – 92.
- [6] Palazzi S, "Recomendaciones complementarias al CIRSOC 201-2002 para la utilización de agregados de la cuenca Salí-Dulce reactivos a la reacción álcalis - sílice", CET NOA Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología UNT, N° 26, (2005), 32 - 40.
- [7] Martínez P, Toledo O, "Hormigón ecológico con residuos de neumáticos y hormigón reciclado". Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, (2017).