

ESTUDIO DE HORMIGONES ELABORADOS CON RESIDUOS DE LADRILLERÍAS Y DE DEMOLICIÓN

M. Suarez², C. Defagot¹, M. F. Carrasco¹, A. Marcipar¹, R. Miretti¹, H. Saus¹

Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI)
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe
Lavaise 610 - (S3000EWB) Santa Fe

Palabras clave: escombros, ladrillos cerámicos triturados, hormigón, bloques

RESUMEN

En la ciudad de Santa Fe (Argentina) los residuos de la industria de la construcción están mayoritariamente constituidos por materiales provenientes de la demolición total o parcial de edificios de vivienda. De acuerdo a las técnicas constructivas tradicionales, gran parte de estos edificios se construían con mampostería de ladrillos cerámicos asentados sobre morteros de cal-arena o cemento-cal-arena. Dichos residuos son retirados de las obras y demoliciones por empresas de servicios, y generalmente son denominados “escombros”.

Por otra parte, en esta misma ciudad y en las zonas aledañas, desarrollan sus actividades las ladrillerías (fábricas de ladrillos cerámicos comunes) obteniendo como desecho de sus procesos productivos el denominado ladrillo triturado.

Estos dos tipos de residuos se han empleado tradicionalmente en la elaboración de hormigones destinados a la construcción de elementos o estructuras poco comprometidas desde el punto de vista resistente, tales como: rellenos, contrapisos y cimientos.

En este trabajo se caracterizaron ambos materiales en base a análisis granulométricos y determinaciones de densidad a granel, absorción de agua y densidad relativa. Con ellos luego se elaboraron hormigones con contenidos variables de cemento y proporciones ajustadas de tal manera de obtener un asentamiento de 8 ± 2 cm.

Sobre los hormigones elaborados se efectuaron determinaciones de densidad, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, tracción por compresión diametral, contracción por secado, absorción de agua, profundidad de penetración de carbonatación, y capacidad y velocidad de succión capilar, a fin de evaluar sus prestaciones resistentes y durables.

Los resultados indican que, si bien no es posible obtener con estos residuos hormigones para uso estructural, existen oportunidades para su aprovechamiento, además de las aplicaciones tradicionales, en la fabricación de elementos constructivos tales como bloques de hormigón para mampostería y bloques para forjados.

Finalmente, estas alternativas de aplicación se comparan, de acuerdo a criterios técnicos y económicos, con elementos similares disponibles actualmente en el mercado local.

¹ Investigador CECOVI - FRSF

² Becario CECOVI - FRSF

INTRODUCCIÓN

El continuo aumento de la población a lo largo de la historia de la humanidad ha sido sostenido por el desarrollo de actividades productivas cuya realidad siempre se tradujo en la explotación de los recursos del planeta, renovables y no renovables. A causa de ello las últimas décadas han encontrado al mundo en situación de preservar y proteger el medio ambiente de un inminente desequilibrio ecológico. Por otra parte, la gran demanda de recursos básicos para determinadas industrias ha llevado a la escasez de materias primas. Bajo estas problemáticas se han impulsado técnicas y tecnologías de reciclaje.

En todo el mundo, la industria de la construcción es la mayor consumidora de recursos naturales tales como los áridos utilizados en la confección de hormigones. Anualmente se producen cerca de 11 billones de toneladas de hormigón, empleando para ello alrededor de 8 billones de toneladas de áridos naturales. Paralelamente, se generan grandes cantidades de desechos, tanto en los procesos constructivos como a partir de obras de demolición y restauración de estructuras y edificios. Entonces, el alto consumo de materias primas, los intereses económicos, y las problemáticas resultantes de los severos impactos generados por la acumulación de esos desechos, obligan a la búsqueda de usos alternativos en este campo.

En nuestro país, cerca del 4% de los residuos originados en la industria de la construcción tiene su origen en obras nuevas, otro 28% proviene de las demoliciones y el 65% representa a las obras de reparaciones, de acuerdo a lo informado por cantera, Giaccio y Zerbino en 2003. A su vez, en referencia a la composición de estos residuos, el 31% está constituido por residuos de hormigón, y aproximadamente el 48% corresponde a escombros de mampostería.

En la ciudad de Santa Fe y alrededores, se detectaron cerca de 10 empresas de recolección de residuos de obras (contenedores) que realizan el retiro de escombros desde el lugar de producción y numerosos corralones que comercializan este material para su utilización en rellenos, contrapisos y cimientos. En todos los casos, el único tratamiento que reciben los residuos es la molienda en trituradoras de mandíbulas y su acopio al aire libre.

Asimismo, entre 6 plantas productoras de hormigón de la zona solo una de ellas comercializa hormigones de escombros procedentes de la demolición de viviendas.

Este trabajo presenta un análisis general de las propiedades físico-mecánicas y durables de hormigones elaborados con agregados reciclados, ampliamente utilizados en el campo de la vivienda, utilizando material de demolición procedente de la industria de la construcción tradicional (escombro de mampostería) dada su mayor difusión en la región y de ladrillo triturado, obtenido a partir de la trituración de ladrillos con defectos geométricos o sobrecocidos que constituyen un desecho con grandes posibilidades de aprovechamiento.

La aplicación de los resultados obtenidos permitiría un mejoramiento de la calidad de los hormigones elaborados con agregados reciclados, y al mismo tiempo la obtención de ventajas económicas. Habitualmente, al no disponerse de fuentes de información fidedignas y por falta de conocimiento acabado de estas tecnologías, quien proyecta hormigón y tiene la posibilidad de emplear hormigones con agregados reciclados, opta por cubrir las incertidumbres con márgenes de seguridad adicionales a partir de mayores consumos de cemento o subestimando las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones a obtener. Otras veces, el proyectista opta por descartar la

posibilidad de emplear un hormigón con agregados reciclados y lo reemplaza por uno convencional. En la primera situación resulta obvia la pérdida económica que se genera, mientras que en el segundo caso se trata de una economía potencial que se desaprovecha teniendo en cuenta la importancia de la reutilización de desechos.

Si bien en la actualidad estos agregados reciclados se emplean en la elaboración de hormigones destinados a rellenos, contrapisos y cimientos, con mínimas exigencias de desempeño, existen algunas experiencias internacionales de aplicación a la fabricación de elementos constructivos tales como bloques, baldosas y adoquines, que permitirían obtener un mayor valor agregado.

MATERIALES Y ENSAYOS

Agregados

El escombros de mampostería habitualmente proveniente de demoliciones se compone mayoritariamente de ladrillo partido (comúnmente denominado cascote) y mortero de asiento o revoque triturado o molido. Dada la importancia del contenido de cascote en este material, se propone comparar los resultados del análisis con los correspondientes a hormigones confeccionados con ladrillo común triturado, y de esta manera poder evaluar la influencia de las impurezas del escombros sobre el comportamiento de los hormigones con él elaborados. Los valores para los hormigones de ladrillo triturado se extrajeron de trabajos anteriormente llevados a cabo en el CECOVI.

El escombros fue adquirido en un corralón de la ciudad de Santa Fe. De esta manera se aseguró la representatividad de la muestra en función de la oferta en el mercado. En el conjunto se observó una gran variedad de partículas de diferentes características constitutivas y dimensionales, tales como ladrillo común triturado, fragmentos de tejas y otros componentes cerámicos, restos de mortero suelto y/o adherido a otras partículas; y un considerable porcentaje de polvo.

El ladrillo triturado fue producido en laboratorio a partir de la trituración de ladrillos cerámicos comunes adquiridos en ladrilleras de la zona, mediante la utilización de una trituradora de mandíbulas de pequeñas dimensiones. Consecuentemente, este agregado no incluyó la importante proporción de partículas finas que sí presenta el escombros.

A fin de caracterizar los residuos como agregados se realizaron análisis granulométricos (IRAM 1505), se determinó el peso unitario seco y compactado (IRAM 1548 – Método B), la densidad aparente y la absorción de agua por inmersión. Para estas dos últimas determinaciones, dada la dificultad derivada de la flotación de las partículas en la determinación de los volúmenes por métodos con recipientes aforados o balanza hidrostática, se utilizó una adaptación del método del picnómetro propuesto por la norma ACI 211, Apéndice A.

Para el ladrillo triturado se revisaron los registros aportados por el grupo de trabajo del proyecto de agregados livianos antes mencionado.

Hormigones

Para los hormigones con escombros se buscó reproducir las dosificaciones empleadas en los hormigones con ladrillo triturado y se obtuvieron por pesado de unidades volumétricas de cada componente en baldes de albañilería de 6 l.

Las tres dosificaciones utilizadas son: A (1 : 2,5 : 3,5), B (1 : 3 : 6), y C (1 : 4 : 8), indicando con esta notación las relaciones en peso de cemento, arena, y el agregado.

Los contenidos de agua empleados fueron los necesarios para obtener un asentamiento medido con el tronco de cono de Abrams (IRAM 1536) de 8 ± 2 cm.

Las probetas fueron desmoldadas a las 24hs, y se mantuvieron sumergidas en una solución saturada de hidróxido de calcio en agua, en ambiente con temperatura controlada de 23 ± 2 °C, hasta la edad de ensayo correspondiente.

Se evaluaron propiedades mecánicas y físicas que permitieron inferir sobre el comportamiento resistente y durable. Se realizaron ensayos de resistencia a compresión sobre probetas cilíndricas de 15 x 30 cm (IRAM 1546), módulo de elasticidad (ASTM C 469), densidad seca, absorción de agua por inmersión (ASTM C 642), capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871), penetración del frente de carbonatación a 7, 28 y 90 días, y resistencia a tracción simple por compresión diametral (IRAM 1658) a 28 días. La contracción por secado se midió hasta edades de 180 y 450 días para los hormigones elaborados con ladrillo triturado y escombro, respectivamente.

La densidad seca se determinó en función de la densidad húmeda y del contenido de humedad de cada probeta ensayada a compresión. La densidad húmeda se calculó como el cociente entre el peso de cada probeta y el volumen de la misma, para efectuar la corrección por humedad, luego de los ensayos de resistencia a compresión, se pesaron trozos de cada probeta y posteriormente se llevaron a estufa a 100 ± 5 °C hasta obtener masa constante.

El avance del frente de carbonatación se determinó sobre secciones aserradas frescas, planas y perpendiculares al eje de las probetas cilíndricas en dirección radial. La determinación se realizó mediante el rociado de una solución alcohólica incolora de fenolftaleína, que vira a tonalidades violáceas para pH superior a 9. Con esto, quedaron determinadas áreas centrales violáceas limitadas por un anillo sin variación de color.

Se realizaron mediciones de contracción por secado con extensómetro mecánico de aplicación equipado con un comparador de 0,001 mm, en condiciones de temperatura y humedad normales de laboratorio. Las mediciones se realizaron en dos caras laterales opuestas correspondientes a probetas de 10 x 10 x 40 cm. Para ello se colocaron un par de puntos fijos de bronce (adheridos con adhesivo epoxi), con una pequeña hendidura para posicionar el comparador. La primer lectura se realizó a la edad de 1 día, luego del desmolde y previo a la inmersión en la solución de hidróxido de calcio. A partir de la edad de 7 días, las probetas se mantuvieron en ambiente de laboratorio secándose al aire, llevando a cabo mediciones periódicas.

Simultáneamente con la determinación de contracción por secado se registraron los pesos de las probetas a fin de evaluar la pérdida de agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos en la caracterización de los residuos, mientras que la Figura 1 muestra las curvas granulométricas correspondientes.

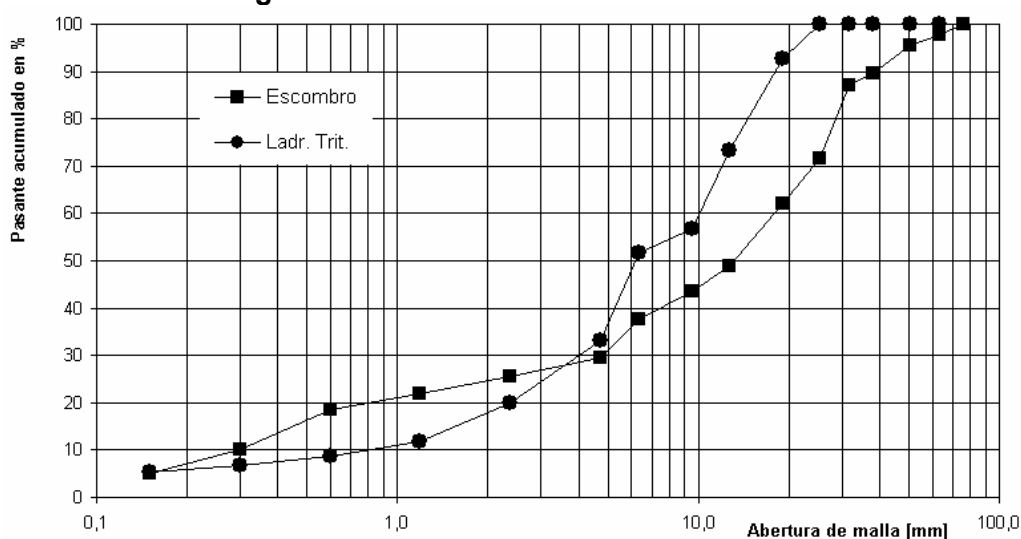
A partir del análisis granulométrico (figura 1) se puede apreciar que el escombro presenta un mayor contenido de material fino a partir de 2.36 mm a pesar de corresponderle un tamaño máximo de partículas superior.

Tabla 1 – Caracterización de los residuos

Determinación	Escombros	Ladrillo triturado
Peso Unitario compactado [kg/m ³]	1257	969
Peso Unitario suelto [kg/m ³]	1099	916
Granulometría TMN [mm]	50	37,5
Absorción [% peso seco] (*)	17,82	20,25
Densidad aparente seca [g/cm ³] (*)	2220	2161
Espacios vacíos [%]	57	45

(*) Los valores corresponden a 2hs de ensayo.

Figura 1 – Granulometría de los residuos



En lo que respecta al material pulverulento, pasante del tamiz de 300 µm, se obtuvieron contenidos del 10.1 y 6.7 % para el escombros y el ladrillo triturado, respectivamente. Además, al determinar las cantidades de material pulverulento, pudieron apreciarse diferencias notables en su composición: en el caso del escombros constituido principalmente por mortero o revoques triturados y en el caso del ladrillo triturado consistente en polvo de ladrillo. Estos porcentajes son comparables con los informados por otros investigadores argentinos.

Con estos agregados se elaboraron hormigones utilizando las dosificaciones y las cantidades de cada uno de los materiales componentes que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 – Kg de material por cada m³ de H^o con residuo

Identificación	Dosificación	Razón a/c	Cemento	Arena	Escombros	Ladrillo triturado	Agua
A	[1 : 2,5 : 2,5]	0.86	322	894	751	***	276
	[1 : 2,5 : 3,5]	1.01	300	834	***	700	303
B	[1 : 3 : 4,5]	1.27	226	752	902	***	288
	[1 : 3 : 6]	1.67	206	687	***	824	345
C	[1 : 4 : 6]	1.56	171	760	912	***	266
	[1 : 4 : 8]	2.21	154	684	***	820	340

Las variaciones que se aprecian en las dosificaciones utilizadas son producto de las diferencias existentes entre los pesos unitarios compactados correspondientes a los ladrillos triturados y escombros (Tabla 1).

Resistencia a compresión

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de edad se resumen en la Tabla 3.

Como puede verse para los resultados de los hormigones con escombro, dados los contenidos de cemento de las diferentes dosificaciones, las probetas "A" alcanzaron los mayores valores de resistencia a compresión para todas las edades. La resistencia lograda a 90 días por las probetas de la dosificación "B" es apenas comparable con la resistencia de las "A" a 28 días, y la máxima alcanzada por las probetas de la dosificación "C", no arriba siquiera a valores comparables con la resistencia a 7 días de las "A".

En función de lo establecido por los Reglamentos CIRSOC 201 "Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado" (Tabla 3 – apartado 6.6.2.2) y CIRSOC 202 "Hormigón liviano de Estructura Compacta. Dimensionamiento, Elaboración y Control" (Tabla 1 – apartado 5.2), la mayoría de los hormigones elaborados no se considera apto para ser utilizado como hormigón estructural, puesto que las resistencias medias a 28 días en ningún caso alcanzan el valor requerido de 17,5 MPa. Sólo el hormigón correspondiente a la dosificación "A" de ladrillos triturados se ajusta a lo establecido por el Reglamento CIRSOC 202 respecto de las consideraciones estructurales.

Es importante destacar que los valores de resistencia a compresión obtenidos en el presente trabajo resultan hasta un 80 % superiores a los informados por otros autores para hormigones de escombro con contenidos unitarios de cemento idénticos.

Si bien las diferencias obtenidas para las edades ensayadas en la resistencia a compresión entre los dos hormigones no es mayor de 3 MPa, se observa que los hormigones elaborados con ladrillo triturado tienden a ser más resistentes a pesar de presentar mayores razones a/c y menores contenidos unitarios de cemento.

La diferencia más significativa entre estos dos agregados es la cantidad y calidad del material pulverulento presente. Si consideramos que este material fino presente en los agregados se incorpora durante el mezclado a la pasta de cemento, los volúmenes de pasta resultan superiores para todas las dosificaciones analizadas en los hormigones elaborados con ladrillo triturado. Asimismo, este contenido de partículas de polvo en el escombro (supuestas carentes de propiedades puzolánicas) puede producir una pasta de cemento de inferior calidad a la que se obtiene en hormigones de ladrillo triturado, provocando una reducción en la resistencia a compresión.

Otra característica de los agregados que puede influir en la resistencia a compresión de los hormigones elaborados es la debilidad propia de estos materiales o la presencia en las partículas de interfases menos resistentes (por ejemplo interfase ladrillo mortero en una partícula de escombro).

Tabla 3 – Resistencia a compresión H^o con residuos [MPa]

Dosificación	Edad [días]	Escombro	Ladrillo triturado
A	7	12,5	13,4
	28	14,8	17,5
	90	18,1	20,5
B	7	8,9	7,3
	28	12,7	12,9
	90	15,2	15
C	7	3,7	4,3
	28	5,8	8,4
	90	8,0	10,4

Módulo de elasticidad

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los ensayos de módulo de elasticidad realizados y en la figura 2 se compara gráficamente esta propiedad para hormigones de escombro y de ladrillo triturado a la edad de 90 días.

Se puede observar en la figura 2 que el módulo de elasticidad a la edad de 90 días resulta mayor para los hormigones de escombro, tanto para las dosificaciones A, B y C, concluyéndose que éstos resultan menos deformables que los hormigones elaborados con ladrillo triturado.

Se debe considerar, al analizar el módulo de elasticidad que los hormigones de ladrillo triturado presentan un contenido de pasta mayor y, por consiguiente, esto puede provocar una mayor deformabilidad en el material.

Resistencia a tracción por compresión diametral

La resistencia a tracción por compresión diametral se determinó a los 28 días de edad (Tabla 5). Puede observarse que la relación existente entre la resistencia a tracción por compresión diametral y la resistencia a compresión simple para esta edad varía entre 0.11 y 0.14, coincidentemente con las relaciones propuestas por Mindess y Young (0.08 a 0.14) y por Mehta y Monteiro (0.09 a 0.11).

Densidad aparente seca

La densidad aparente seca se determinó a 7, 28 y 90 días para los hormigones de escombro y para los hormigones de ladrillo triturado a 28 días. Los resultados se resumen en la Tabla 6.

Al graficar los resultados de resistencia a compresión en función de la densidad aparente seca para cada uno de los hormigones estudiados, puede observarse como para las probetas de la dosificación C, en las que las densidades son menores por el mayor contenido de escombro y la mayor relación agua-cemento, las resistencias a compresión para todas las edades resultaron también menores. Esta relación general se cumple para hormigones correspondientes a ambos agregados.

Tabla 4 – Módulo de elasticidad del H° con residuos [GPa]

Dosificación	Edad [días]	Escombros	Ladrillo triturado
A	7	11,5	***
	28	14,7	***
	90	19,2	14,6
B	7	11,8	***
	28	14,8	***
	90	17,1	11,3
C	7	8,1	***
	28	9,1	***
	90	11,5	8,7

Figura 2 – Comparación de resultados de Módulo de elasticidad [GPa] a 90 días

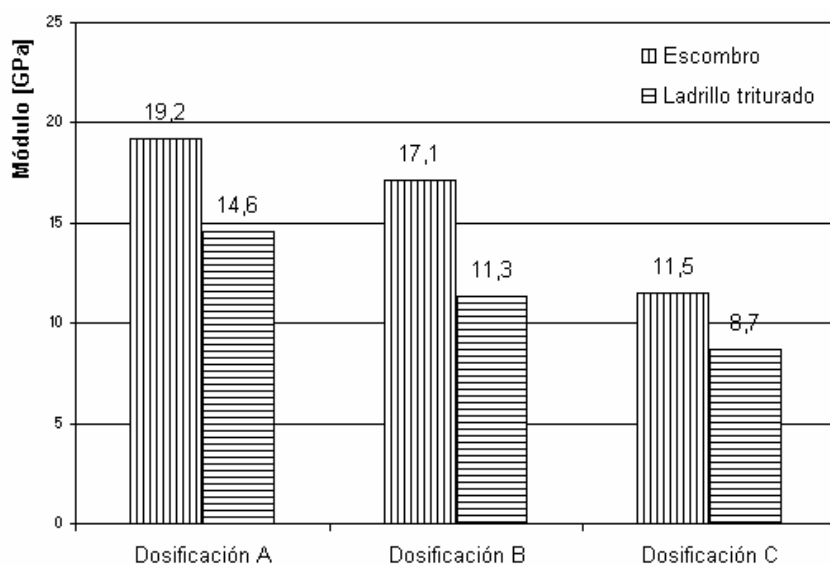


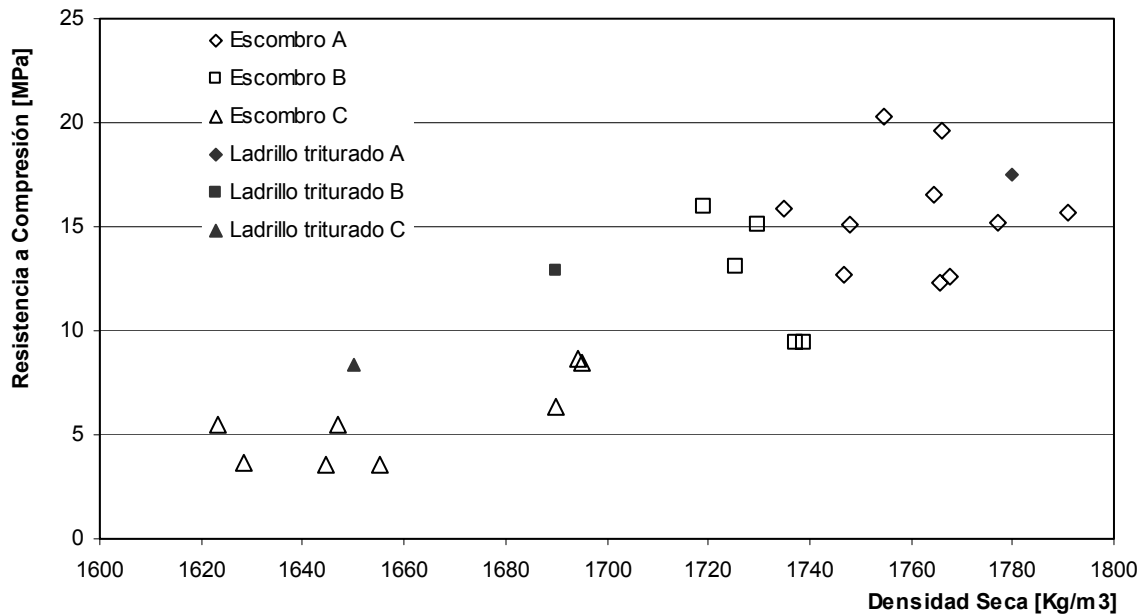
Tabla 5 – Resistencia a tracción por compresión diametral [MPa]

Propiedad	Dosificación A	Dosificación B	Dosificación C
Resistencia a tracción por compresión diametral [MPa]	1,66	1,43	0,79
Relación Tracción por compresión diametral/ Compresión	0.11	0.11	0.14

Tabla 6 – Densidad seca [kg/m³]

Dosificación	Edad [días]	Escombros	Ladrillo triturado
A	7	1760	***
	28	1772	***
	90	1755	1780
B	7	1738	***
	28	1726	***
	90	1724	1690
C	7	1643	***
	28	1653	***
	90	1695	1650

Figura 3 – Relación densidad seca vs. Resistencia a compresión



Carbonatación

La penetración del frente de carbonatación se midió sobre las probetas de hormigones elaborados con escombro registrándose valores del orden de 2 mm en las probetas “A”, para las probetas de la dosificación “B”, se midieron valores de entre 2 y 3,5mm; y para las probetas de la dosificación “C”, se registraron penetraciones variables entre 8 y 9 mm (Tabla 7). Estos resultados se justifican a través de la mayor porosidad y permeabilidad al aire de las variadas partículas del agregado, especialmente aquellas constituidas por mortero y ladrillo común.

El proceso se intensificó para edades mayores, y a causa de la disposición azarosa de las partículas de escombro en determinadas direcciones (radiales por ejemplo), el frente de carbonatación alcanzó en algunos casos puntos cercanos al centro de la sección. Por otro lado, se observó que las partículas de tejas actuaron como verdaderos frenos de este proceso, y en las cuales es notorio como el frente debió rodearlas. Un parámetro de gran influencia en la velocidad de este proceso es, sin dudas, la elevada relación agua/cemento utilizada para lograr una consistencia adecuada de las mezclas y que provoca la formación de un volumen importante de poros en los hormigones.

Un fenómeno muy notorio fue la presencia de carbonatación envolviendo partículas de agregado posicionadas en la sección fuera del alcance del avance progresivo desde el exterior, es decir dentro del área “perimetral” violáceo tras el rociado con fenolftaleína. Esto posiblemente tenga relación con procesos de carbonatación, totales o parciales, de las partículas de mortero o de porciones de estas adheridas a partículas de ladrillo, ocurridos previo a su incorporación en la masa del hormigón.

Capacidad y velocidad de succión capilar

Los ensayos de capacidad y velocidad de succión capilar se realizaron exclusivamente sobre probetas correspondientes a las tres dosificaciones estudiadas de hormigones de escombro y los resultados se resumen en la Tabla 8.

Tabla 7 – Penetración del frente de carbonatación [mm]

Edad [días]	Dosificación A	Dosificación B	Dosificación C
7	0	0	0
28	1,5 - 2,5	2 - 3,5	3,5 - 9
90	2,5 - 3,5	5 - 8	***
>365	6 - 15	10 - 25	***

(***) Problemas con las probetas C imposibilitaron las mediciones.

Tabla 8 – Capacidad y velocidad de succión en H° de Escombro

Determinación	Edad [días]	Dosificación A	Dosificación B	Dosificación C
Capacidad [g/m ²]	7	12221,6	10634,3	11284,8
	28	9766,6	10410,4	10025,6
	90	9132,4	10558,4	10986,5
Velocidad [g/m ² s ^{1/2}]	7	***	49,7	80,4
	28	31,6	39,6	43,3
	90	22,3	40,2	38,2

(***) El valor de velocidad de las probetas A a 7 días se descarta por diferencias en la geometría de las mismas que alteran ese parámetro.

Comparando los valores obtenidos con respecto a resultados correspondientes a hormigones de agregados convencionales confeccionados con cemento pórtland (bibliografía y resultados de ensayos interlaboratoriales), se observa en las probetas de hormigón con escombro un incremento importante en ambos parámetros. Los hormigones de agregados convencionales presentan valores de capacidad y velocidad de succión capilar que varían entre 1500 y 3000 g/m² y 2.5 y 5 g/m². s^{1/2}, respectivamente.

El incremento de estos parámetros está relacionado por un lado, con la mayor porosidad e interconexión de los capilares, producto de las elevadas relaciones agua-cemento; y paralelamente a ello, la mayor porosidad y capacidad de absorción del agregado respecto a los de la matriz. Esto último tiene mucha importancia en cuanto al grado de avance del agua dentro de la masa del hormigón, ya que la disposición arbitraria de las partículas, al igual que con la carbonatación, contribuye y facilita ese proceso.

Absorción de agua por inmersión

Las determinaciones de absorción de agua por inmersión se realizaron exclusivamente sobre probetas correspondientes a las tres dosificaciones estudiadas de hormigones de escombro y los resultados se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9 – Absorción por inmersión [%]

Edad [días]	Dosificación A		Dosificación B		Dosificación C	
	A 48 hs	Estabilizada	A 48 hs	Estabilizada	A 48 hs	Estabilizada
7	10,9	11,2	12,8	13,5	12,6	12,8
28	10,7	11,5	12,3	12,6	***	12,9
90	***	***	12,2	13,0	13,3	13,8

Tal como se señaló en el análisis del comportamiento de los hormigones frente a procesos de succión capilar, se observa en las probetas de hormigón con escombros valores de absorción de agua por inmersión que duplican los obtenidos habitualmente para hormigones de agregados convencionales. Este regular desempeño se debe a la mayor porosidad e interconexión de los capilares de la pasta y a la importante absorción característica en los escombros utilizados.

Contracción por secado y pérdida de agua

La figura 4 corresponde a la evolución de la contracción por secado y de la pérdida de agua de hormigones con escombros y hormigones con ladrillo triturado, respectivamente.

En la figura 4a puede apreciarse que dentro de los primeros 28 días se produjeron para todas las dosificaciones deformaciones del orden del 35-40% de la contracción final, y cerca del 75% de la misma para la edad de 90 días. Por otro lado, a edades próximas a los 240 días es notoria una tendencia a estabilizarse para valores que van desde 750 $\mu\text{m}/\text{m}$ en la dosificación "A", a 900 $\mu\text{m}/\text{m}$ para las dosificaciones "B" y "C". En la figura 4b se observa como la contracción en los hormigones con ladrillo triturado alcanzó valores finales menores que los hormigones con escombros, entre 700 y 750 $\mu\text{m}/\text{m}$, comenzando el proceso de estabilización a edades cercanas a los 100 días. Esto es, los hormigones con ladrillo triturado se deformaron menos y necesitaron menos tiempo para estabilizarse que los hormigones con escombros.

En la figura 4c se observa que en los primeros 28 días la dosificación "A" registró pérdidas de agua de aproximadamente el 50% del valor final, para luego estabilizarse a edades entre los 50 y 60 días. Las dosificaciones "B" y "C" a 28 días registraron cerca del 60% del valor final, y se estabilizaron poco después de los 60 días de edad. Para hormigones con ladrillo triturado, (figura 4d) se aprecia que dentro de los primeros 28 días la dosificación "A" registró pérdidas de aproximadamente el 50% del valor final, para luego estabilizarse a edades de 50 a 60 días, coincidentemente con los hormigones con escombros. Dado que para las dosificaciones "B" y "C" se carece de los registros a 28 días, las curvas en ese tramo no representan de forma adecuada el proceso, y consecuentemente, no es posible hacer una apreciación al respecto. Por otro lado, si puede hacerse mención de la etapa de estabilización, que mostró un comportamiento similar al de las restantes dosificaciones. Así, es posible inferir que para los hormigones con escombros la estabilización de la pérdida de agua es más tardía y con valores más altos que para los hormigones con ladrillo triturado.

Representando en la figura 5a la contracción por secado en función de la pérdida de agua de hormigones con escombros, se evidencian en las curvas dos tendencias características del proceso, una primera que marca la pérdida del agua en los poros capilares, para lo cual la estructura presenta leves deformaciones; y una segunda tendencia, en la que para eliminar el agua adsorbida sobre las partículas de silicato de calcio hidratado se producen mayores deformaciones en la estructura. En la figura 5b, correspondiente a hormigones con ladrillo triturado, la carencia de registros para la edad de 28 días en las dosificaciones "B" y "C" impide la apreciación del fenómeno para las mismas. Para la dosificación "A", en cambio, este se hizo muy notorio.

Una explicación para los resultados obtenidos en estas determinaciones puede estar relacionada con un factor mencionado en apartados anteriores: la menor calidad de la pasta de los hormigones confeccionados con escombros, compuesta por un mayor porcentaje de partículas pulverulentas. Esta característica tuvo influencia en la

resistencia, el módulo de elasticidad, y por generar una estructura más abierta y porosa, también en el secado de estos hormigones.

Por otro lado, debido a que en los hormigones de escombro se verificaron mayores deformaciones que en los elaborados con ladrillo triturado que presentan mayores relaciones agua/cemento, puede inferirse que, desde el punto de vista de la contracción de los hormigones, el contenido de impurezas en el escombro fue mas influyente en la calidad de la pasta que las elevadas relaciones a/c.

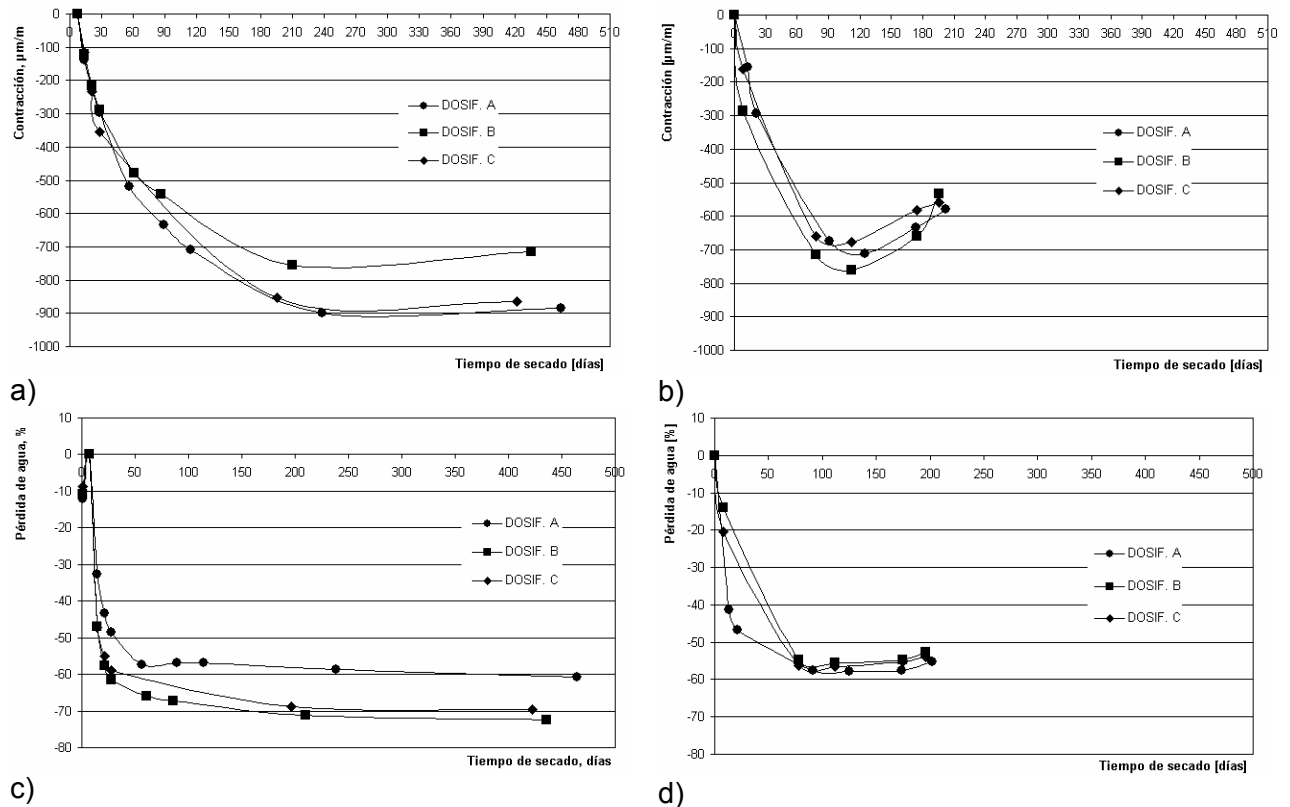


Figura 4: Evolución de la contracción por secado a) del hormigón con Escombro, b) del hormigón con ladrillo triturado y evolución de la pérdida de agua c) del hormigón con Escombro, d) del hormigón con ladrillo triturado

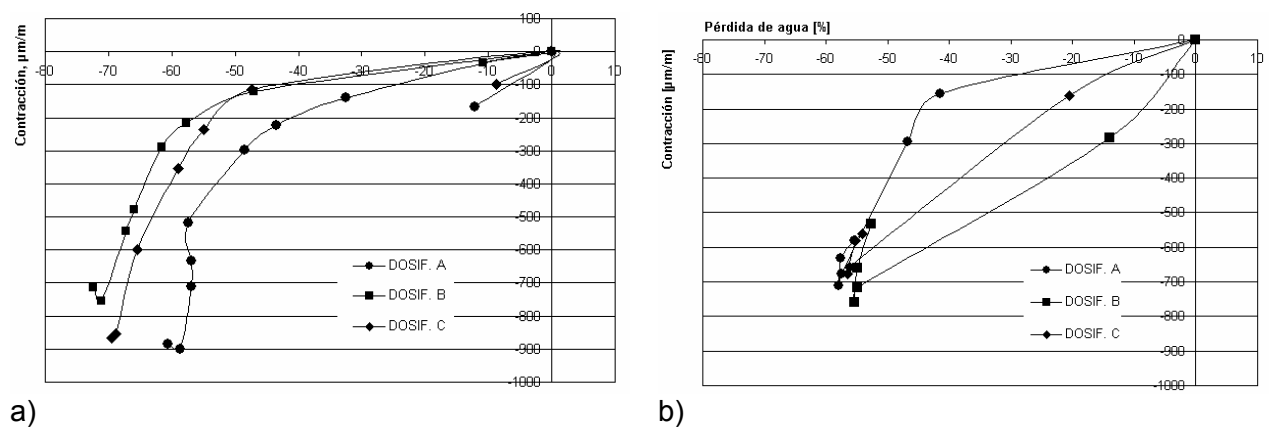


Figura 5: Relación entre contracción por secado y pérdida de agua a) del hormigón con Escombro, b) del hormigón con ladrillo triturado

ANÁLISIS DE APLICACIONES A PARTIR DE REQUISITOS NORMATIVOS

Se analizan a continuación las posibles aplicaciones de los hormigones estudiados, tomando en consideración los requisitos normativos existentes en cada uno de los casos analizados.

De acuerdo con las exigencias de la norma IRAM 1567:1977 “Agregados livianos para hormigón estructural”, para que un agregado sea considerado liviano no debe tener una densidad seca y suelta mayor de 1040Kg/m^3 para una combinación de fracción fina y gruesa. El agregado de escombro tiene una densidad seca y suelta de aproximadamente 1090Kg/m^3 , por lo tanto no cumple con los requisitos establecidos, si bien se encuentra muy próximo al requisito. Tampoco es apto desde el punto de vista de la granulometría ya que no está dentro de los límites establecidos en la Tabla 1 de la mencionada norma, pero este aspecto sería susceptible de modificarse a partir del procesamiento del material. En base a los resultados obtenidos de resistencia a compresión, se puede afirmar que el agregado de escombro no permitiría elaborar hormigones livianos que cumplan con los requisitos de la norma IRAM 1567:1977. Dicha exigencia, para densidades entre 1680Kg/m^3 y 1760Kg/m^3 , está dada por valores a 28 días de 18Mpa y 20Mpa respectivamente. Considerando las densidades de los hormigones de escombro a esa edad, solo se enmarcan aquellos de las dosificaciones A y B, pero ni en el mejor de los casos, es decir para la dosificación A, se arriba al valor mínimo exigido de resistencia.

Respecto de las exigencias en cuanto a la contracción final por secado, todas las dosificaciones cumplen con lo exigido ya que presentan valores inferiores a $1000\ \mu\text{m/m}$ (0,10%).

Por otra parte, la norma IRAM 11561-2:1997 “Bloques no portantes de hormigón. Requisitos”, hace referencia a una resistencia media exigida para la sección neta de bloques no inferior a 4 MPa y valores individuales no inferiores a 3.5 MPa. La norma IRAM 11561-3:1998 “Bloques portantes de hormigón. Requisitos”, exige un valor de resistencia de la sección bruta promedio no inferior a 6 MPa y valores individuales no inferiores a 5 MPa. En caso de bloques macizos, este sería el valor a adoptar para el hormigón. Si se considera que en los bloques huecos tradicionales existe un 60 % de vacíos, la resistencia a considerar para el hormigón resultaría de 15 MPa en promedio y 12,5 MPa para valores individuales. En función de lo expuesto, se puede inferir que los hormigones de las dosificaciones A y B planteadas, a partir de los 7 días de edad cumplen con los requerimientos de resistencia para la confección de bloques macizos portantes y por ende también para bloques no portantes. Los hormigones de la dosificación C cumplen perfectamente con los requerimientos para bloques macizos no portantes.

Suponiendo bloques huecos, sólo la resistencia de los hormigones de las dosificaciones A y B a edades cercanas a los 90 días cumplimentan los requerimientos. Finalmente, la norma IRAM 11711:1995 “Bloques de hormigón para forjados” exige que el bloque, simplemente apoyado reproduciendo la situación sobre las viguetas y cargado en su línea central, soporte una carga de 150 daN (= $1500\text{N} \approx 150\text{Kg}$). Si se considera una luz entre apoyos de aproximadamente 50 cm, esta carga produciría un momento flector de aproximadamente 1875 Kgcm. Adoptando una sección transversal de 50cm x 12cm, el módulo resistente (W_x) resulta igual a 1200cm^3 . De este modo, la resistencia a tracción necesaria es de al menos $1,56\text{Kg/cm}^2$ (0,15 MPa). Comparando con los valores de resistencia a tracción por compresión diametral obtenidos se verifica holgadamente el cumplimiento de los requisitos para las tres dosificaciones planteadas.

CONCLUSIONES

De acuerdo al cumplimiento de los requisitos antes expuestos, no puede calificarse a los hormigones de escombro como hormigones livianos estructurales, pero si como hormigones aptos para la fabricación de bloques portantes y no portantes y bloques para forjados.

En función de los valores actuales en el mercado es posible afirmar que el empleo de hormigones de escombro en la fabricación de bloques para muros y para forjados puede resultar competitivo.

No obstante, a fin de realizar un correcto diseño de estos elementos constructivos deberá tenerse en cuenta el regular comportamiento durable de estos hormigones, sobretodo desde el punto de vista de la porosidad y la carbonatación.

BIBLIOGRAFIA

- Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 1997.
- P.K. Metha, P.J.M. Monteiro, Concrete structure, properties and materials, (E.E.U.U.: Prentice Hall, Inc., 1993).
- S. Mindess, J.F. Young, Concrete, (E.E.U.U.: Prentice Hall, Inc., 1981).
- J. Domínguez, V. Villanueva, E. Martínez, Elementos constructivos aplicables a viviendas de interés social fabricados con áridos reciclados. Revista Ingeniería de Construcción, Escuela de Ingeniería PUCChile, Vol. 19, N°1, 2004, pp. 49-58.
- C. Aguilar, M.P. Muñoz, O. Loyola, Uso de hormigón reciclado en la fabricación de hormigones. Revista Ingeniería de Construcción, Escuela de Ingeniería PUCChile, Vol. 20, N°1, 2005, pp. 35-43.
- C. Hernández, G. Fornasier, Caracterización de hormigones elaborados con agregado grueso reciclado. Revista Hormigonar, Asociación Argentina del Hormigón Elaborado, Año 3, Ed. 7, 2005, pp. 6-14.
- L. Señas, C. Priano, G. Cabo, J. Valea, Comportamiento de hormigón reciclado con material de mampostería. Seminario FIB "El hormigón estructural y el transcurso del tiempo", Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Vol. 2, 2005, pp. 737-800.
- Norma ACI 211.2/81 - Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete.
- Reglamento CIRSOC 201/82 - Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado.
- Norma ASTM C 469/02 - Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- Norma ASTM C 642/97 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- Norma IRAM 1505/03 - Agregados. Análisis granulométrico.
- Norma IRAM 1509/87 - Agregados para hormigones. Muestreo.
- Norma IRAM 1546/92 - Hormigón de cemento Pórtland. Método de ensayo de compresión.
- Norma IRAM 1548/03 - Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos.
- Norma IRAM 1567/77 - Agregados livianos para hormigón estructural
- Norma IRAM 1658/95 - Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral.
- Norma IRAM 1871/05 - Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido.
- Norma IRAM 11561-2/97 - Bloques no portantes de hormigón. Requisitos.
- Norma IRAM 11561-3/98 - Bloques portantes de hormigón. Requisitos.
- Norma IRAM 11711/95 - Bloques de hormigón para forjados.