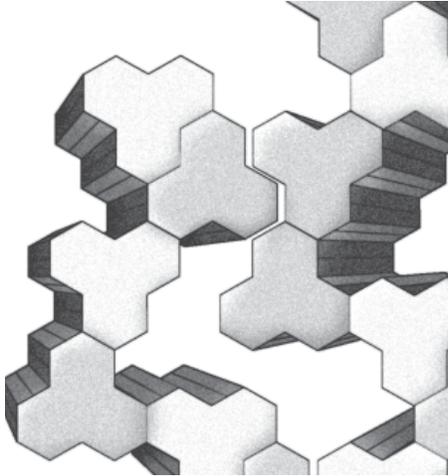


La microestructura de los prefabricados de concreto



Ángela María Hincapié Henao

Ingeniera Civil y Magíster en Ingeniería. Asesora de Calidad Industrias Concretodo.
ahincapie@epm.net.co

Yesid de Jesús Montoya Góez

Ingeniero Civil. Candidato a magíster en la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero de Calidad Industrias Concretodo.
yджmonto@hotmail.com

Recepción: 20 de enero de 2005 | Aceptación: 11 de noviembre de 2005

Resumen

El concreto seco vibrocompactado es un material que por sus características de rápido desmoldeo permite la elaboración de una amplia gama de productos prefabricados, como bloques, adoquines, tuberías, entre otros. Existen muchos estudios sobre las características mecánicas de estos elementos, sin embargo existen muy pocos, inclusive a nivel internacional, que correlacionen estas características con la estructura interna del material y el porqué de su comportamiento.

Este artículo presenta los resultados de un estudio sobre los concretos secos vibrocompactados para adoquines de concreto, teniendo en cuenta la resistencia mecánica y su correlación con la microestructura. Se utilizaron tres mezclas (dos concretos secos y una de concreto convencional) y se comparan los resultados en cuanto a comportamiento mecánico, microestructura y porosidad. El estudio de la distribución de la porosidad se realiza por medio de porosimetría de mercurio, y la estructura interna del material por medio de microscopía electrónica de barrido SEM. Los resultados muestran la influencia de las microfisuras en la resistencia mecánica y la razón por la cual un producto como el adoquín, dosificado con menos cantidad de cemento que un concreto convencional, tiene un buen comportamiento mecánico.

Palabras Clave

Concreto seco
Vibro-compactación
Microestructura
Resistencia
Porosidad

Micro-Structure of concrete prefabricates

Abstract

Dried vibro-compacted concrete is a material that because of its characteristics of fast unmolding enables the elaboration of a wide variety of prefabricated products such as: blocks, bricks, pipes, among others. There are many studies on the mechanical characteristics of these elements; nevertheless, there are few studies even at an international level, where these characteristics are co-related with the internal structure of the material and the reasons for the performance.

This article presents the results of a study on vibro-compacted dry concretes for concrete bricks, having in mind the mechanical resistance and its co-relation with the micro-structure. Three mixtures were used (two of dry concrete and one of conventional concrete) and the results are compared in their mechanical performance, micro-structure, and porosity. The study for porosity distribution is carried out through mercury porosimetry and the internal structure of the material is done by means of SEM scanning electronic microscopy. The results show the influence of micro-fissures in the mechanical resistance and why a product such as brick, with a minor dose of cement than a conventional concrete, has a good mechanical performance.

Key words

Dry-concrete
Vibro-compacting
Micro-structure
Resistance
Porosity

Introducción

Hoy la tecnología del concreto seco vibrocompactado se usa en la elaboración de una amplia gama de productos prefabricados, como tuberías, bloques, adoquines, entre otros. Aunque estos productos pueden diferir en las proporciones de sus materiales constituyentes y métodos de fabricación, todos ellos comparten importantes características, como el desmoldeo inmediato y asentamiento nulo.

El concreto seco vibro-compactado es una mezcla de cemento Pórtland, agregados, agua, y en algunos casos, aditivos y adiciones. La literatura menciona que la relación A/C para estos concretos puede estar por debajo de 0,4 (Paakinen, 1986); sin embargo esto no es del todo cierto, pues la cantidad de agua en la mezcla depende de la superficie específica de los agregados. La conformación de concreto seco vibro-compactado se consigue sometiendo la mezcla a vibración mecánica y

presión, obligando a las partículas del material a acomodarse dentro de la formaleta; por esta razón la mezcla debe ser lo suficientemente rígida como para permitir su consolidación y desmoldeo, pero también debe ser tan húmeda que permita una adecuada distribución de la pasta a través de la masa de los elementos durante las operaciones de mezclado y vibrado. La manejabilidad requerida en estas mezclas normalmente se alcanza controlando la cantidad de agua o la proporción de pasta de cemento en la mezcla.

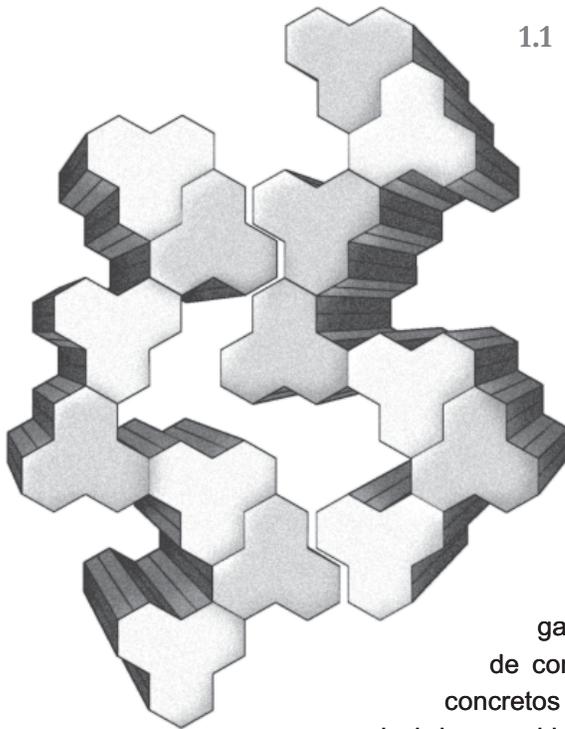
Existen muchas publicaciones relacionadas con elementos prefabricados (Pfeiffenberger, 1987) (Pfeiffenberger, 1984) (King, 1995) (Piernas *et.al.*, 2002), especialmente sobre el uso y propiedades mecánicas de bloques, adoquines y tuberías. Sin embargo, temas como procesos de conformación, dosificación, curado, porosidad, resistencia mecánica y microestructura, que están directamente vinculados con la durabilidad, han sido muy poco

estudiados (Marchand *et. al.*, 1996), (Wiering y Juvas, 1990), (Lange *et. al.*, 1999),. Este conocimiento resulta sumamente importante para la industria de los prefabricados, no sólo en el manejo adecuado de sus dosificaciones y propiedades sino para entender las posibles patologías que se puedan presentar a nivel del material.

El objetivo de este trabajo es el estudio de la microestructura de los concretos secos vibrocompactados, permitiendo explicar el comportamiento del material, tan importante en la industria de los prefabricados.

1. Antecedentes de esta investigación

Para este trabajo se hizo énfasis en el estudio específico de las propiedades físico-mecánicas, acompañado de una interpretación microestructural del material.



1.1 Propiedades físico mecánicas

La resistencia a la flexotracción es una de las propiedades importantes a evaluar en los adoquines de concreto. Marchand *et.al.*, (1996). evaluó la resistencia mecánica de mezclas secas de adoquines por medio de un ensayo a compresión. Estas muestras arrojaron valores entre los 37 MPa y 63 MPa de resistencia a la compresión, cuyo equivalente en resistencia a la flexión, según algunos autores (Marshalls, 1994), es de 4,7 MPa y 8.1 MPa.

1.2 Microestructura

En la literatura no es fácil encontrar investigaciones sobre el tema; sin embargo, por la manera de conformación de los concretos convencionales y los concretos secos, es posible que se encuentren diferencias a nivel de porosidad entre uno y otro. Temas como la distribución de tamaños del poro, fisuras por retracción y adherencia a los agregados, deben ser estudiados para un mejor entendimiento de este material.

Porosidad

La porosidad influye no sólo en la absorción del material sino también en su resistencia. Estudios realizados por Shimomura y Maekawa (1997) revelaron que la inclusión de polvos inertes de mármol actúan como llenantes de la matriz, disminuyendo así la porosidad y aumentando la resistencia mecánica de los concretos. Diversos

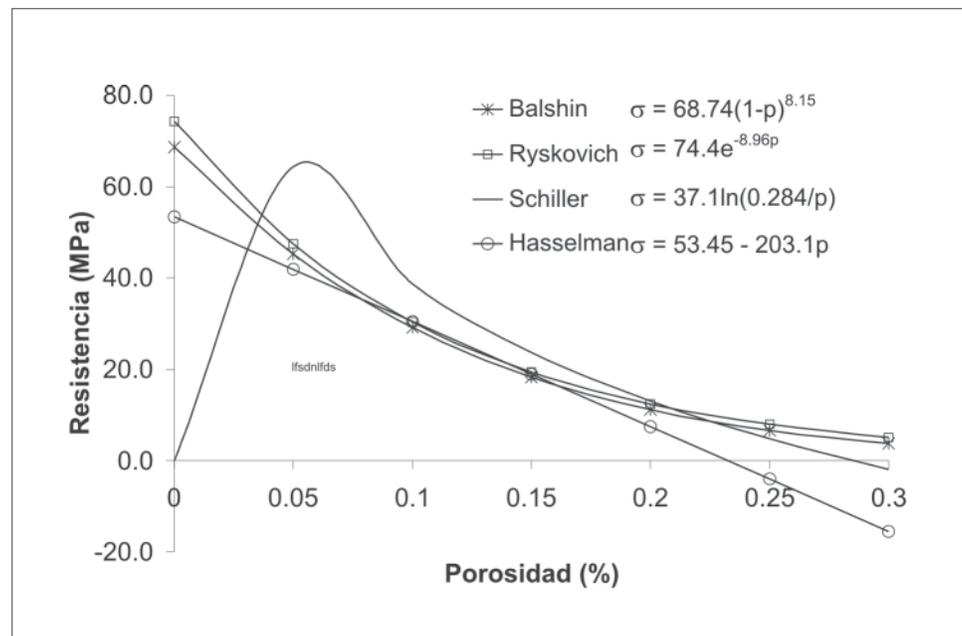
modelos han tratado de establecer una relación entre la porosidad y la resistencia de la mezcla (Kumar y Bhattachrjee, 2003). En la Figura 1 se muestran algunos de estos modelos.

Según los resultados obtenidos por Marchand *et. al.* (1996), la porosidad de los concretos secos, en comparación con los concretos convencionales, es mayor. Sin embargo estudios previos han demostrado que, aunque este fenómeno ocurra, la resistencia del material no se ve influenciada. Esto debido a las técnicas de producción en la conformación de los especímenes.

Morfología

Las observaciones microestructurales hechas por Marchand *et. al.* (1996), utilizando microscopio electrónico de barrido, muestran que las mezclas secas para la fabricación de adoquines exhiben poros más esféricos que las mezclas de concretos menos secos. Al igual que la porosidad, el autor atribuye a la naturaleza de la compactación tal apariencia; según esto, los concretos secos fueron vaciados en moldes rígidos y las mezclas fueron sometidas a presión triaxial, de modo que las tensiones en la masa son de naturaleza hidrostática.

Figura 1. Relación entre la porosidad y la resistencia



Fuente: Kumar, R. y Bhattachrjee, B (2003). "Porosity, size distribution of pore an insitu strength in concrete" En: *Cement and Concrete Reseach*. No. 33. pp. 155-164.

2. Materiales

Mezclas

Se evaluaron dos mezclas de concretos secos y una de concreto convencional. Las especificaciones y nomenclatura de las mezclas se muestran en la Tabla 1. La literatura menciona que mezclas de adoquines con relación cemento-agregados de 1:6,5, presentan buen comportamiento.

Tabla 1. Mezclas usadas en la fase experimental

Mezcla	Dosificación*	% adición
M1	1:6,5	0
ML1	1:6,5	10% polvo ladrillo
PM	1:6,5	10% polvo mármol
CN(concreto convencional)	1:4	0

* Dosificación en peso

Materiales

Las mezclas son fabricadas con cemento Pórtland Tipo III, cuyas características físicas y químicas se muestran en la Tabla 2. En la Tabla 3 se muestran las características granulométricas de las arenas usadas en la fabricación de los elementos. También se utilizó polvo de ladrillo y de mármol como llenante de espacios vacíos, para evaluar su efecto sobre las propiedades mecánicas de los concretos secos. Según Shimomura y Maekawa (1997), la adición de polvos minerales inertes al cemento disminuye la porosidad de los concretos y aumenta la resistencia mecánica. La distribución granulométrica del polvo de ladrillo y de mármol se muestra en la Tabla 4.

3. Programa de ensayos

Todas las mezclas de concreto se prepararon en una mezcladora de espas rotativas. Los elementos fueron vibrados y compactados en una máquina

para fabricación de adoquines convencionales, marca *Columbia Machine Inc.* Con las mezclas se obtuvieron adoquines de dimensiones de 6 cm x 10 cm x 20 cm. Para los concretos convencionales se elaboraron cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura.

Los elementos se curaron según recomendación de la literatura internacional (Jaegermann, *et.al.*, 1978). Los cilindros de concreto normal fueron curados en bolsas plásticas durante 24 horas y luego fueron sumergidos en agua a una temperatura entre 20° C – 23° C hasta el momento del ensayo.

Los adoquines de concreto seco fueron sometidos a pruebas de flexo tracción para evaluar su módulo de rotura (MR) y el porcentaje de absorción de acuerdo con la norma NTC 2017 (Norma Técnica Colombiana 2017). De cada una de las muestras se extrajo una porción para ser analizada bajo las técnicas de microscopía electrónica, estereoscopia de bajos aumentos y porosimetría de mercurio.

Tabla 2. Caracterización química y física del cemento Portland tipo III

Caracterización Física	Gravedad Específica (g/cm ³)	3,12
	Finura Blaine (cm ² /g)	5200
	Consistencia (%)	28
	Fraguado inicial (min)	90
	Fraguado final (min)	180
	Resistencia (MPa) 3 días	29
	Resistencia (MPa) 7 días	38,7
	Resistencia (MPa) 28 días	49
Caracterización Química	%Al ₂ O ₃	4,83
	%SiO ₂	20,68
	%Fe ₂ O ₃	3,47
	%CaO	63,68
	%MgO	2,34
	%C ₃ A	6,93
	Residuo insoluble	1,52
	%P.P.C	1,64

Tabla 3. Granulometría arenas

Tamiz Número - abertura(mm)	Arena para Adoquines	Curva ideal adoquines (Besser)
N ½ - 12,5 mm	0	0
N 3/8 - 9,5 mm	0	0
N 4 - 4,75 mm	16	8-23
N 8 - 2,36 mm	20	16-33
N 16 - 1,18 mm	16	14-19
N 30 - 0,60 mm	14	12-15
N 50 - 0,300 mm	13	5-14
N 100 - 0,150 mm	11	2-8
N 200 - 0,075 mm	7	2-8

Tabla 4. Distribución granulométrica del polvo de mármol y ladrillo

Tamiz	% Acumulado que pasa	
	Polvo ladrillo	Polvo Mármol
3,8"	100	100
No. 4	100	100
No. 8	99,4	96
No. 16	82,4	77
No. 30	68,8	62
No. 50	50,2	41
No. 100	42,6	30
No. 200	25	15
No. 235	15	10
Fondo	0	0

4. Resultados y discusión

4.1 Pruebas físico mecánicas

Los resultados de las pruebas mecánicas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Absorción y resistencia mecánica de los concretos

Mezcla	Comportamiento mecánico (MPa)	Absorción (%)
M1	5,2 (flexión)	6.8
ML1	4,8 (flexión)	7.6
PM	6,3 (flexión)	5.6
CN	36 (compresión)	-

En la Tabla 5 se observa que la adición de polvo de ladrillo no mejora la resistencia de la mezcla, pero afecta la absorción del material, pues el ladrillo es un material altamente poroso a nivel microscópico. El polvo de mármol mejoró significativamente la resistencia a flexo tracción y la absorción del concreto seco en un 20%; el polvo de mármol actuó como llenante reduciendo la porosidad de la mezcla, como se verá más adelante. Éste ayuda a formar una matriz más compacta, coincidiendo con los resultados de algunos investigadores Shimomura y Maekawa (1997). Las pruebas realizadas por Marchand *et. al.* (1996) reportan valores para resistencia a la compresión en los concretos para adoquines, ligeramente iguales a los encontrados en los ensayos de este trabajo, a excepción de la mezcla M1, la cual es 15% mayor.

4.2 Microestructura y Porosimetría

La Figura 2 muestra la apariencia de los concretos M1, ML1 y CN. Las microfotografías presentan tonalidad rojiza o verde debido al pigmento aplicado para resaltar la matriz. Llama la atención la mayor porosidad en las mezclas secas M1 y ML1 con respecto a la mezcla CN.

Estas observaciones pueden ser complementadas con los resultados obtenidos con el porosímetro de mercurio en la Figura 3. La muestra M1 presenta más poros que los concretos

convencionales (muestra CN); esto concuerda con los resultados de Marchand *et. al.* (1996) en cuanto al comportamiento. Sin embargo, para tratarse de mezclas tan diferentes, la porosidad para diámetros medios de poro mayores a $0,4 \mu\text{m}$ resulta semejante en ambas mezclas. Si el proceso de conformación fuera el responsable de la porosidad en los concretos secos, la diferencia entre el concreto normal y la muestra M1 debería permanecer hasta tamaños más grandes de poros, de hasta al menos $100 \mu\text{m}$.

Figura 2. Microfotografía de diferentes concretos

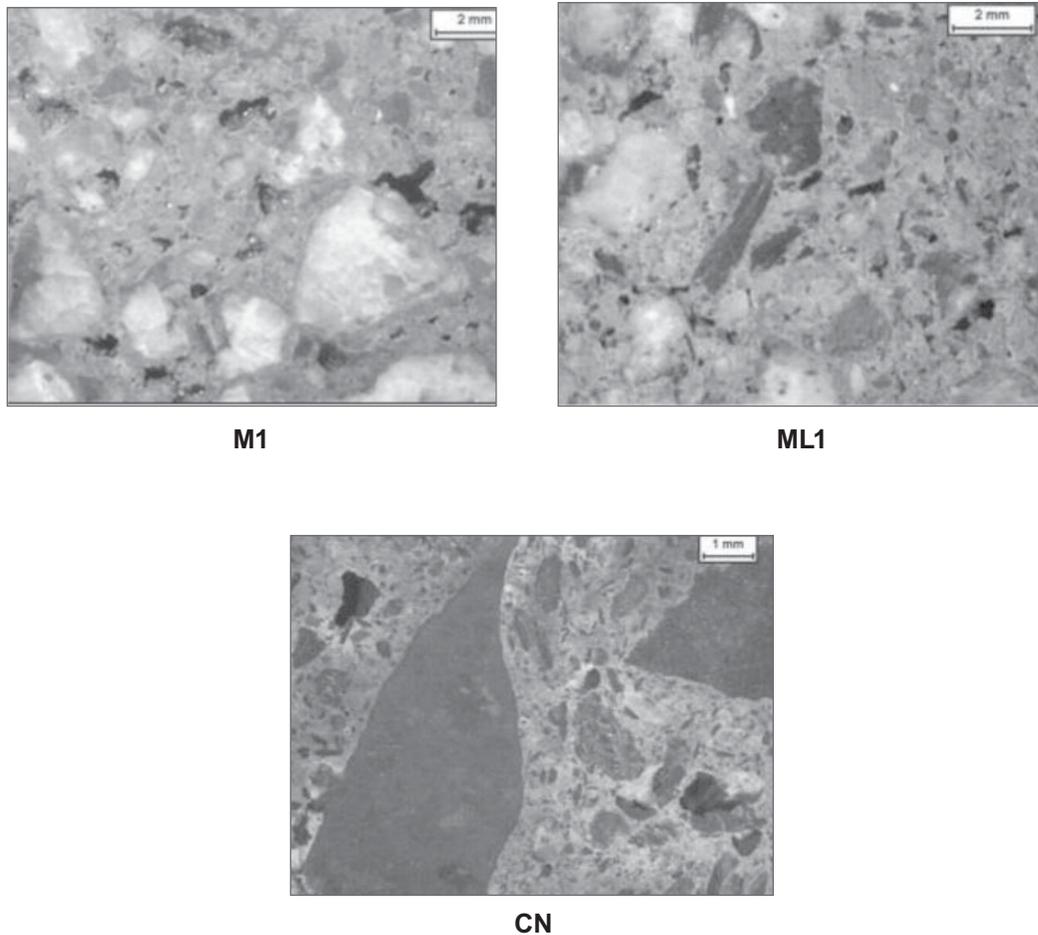
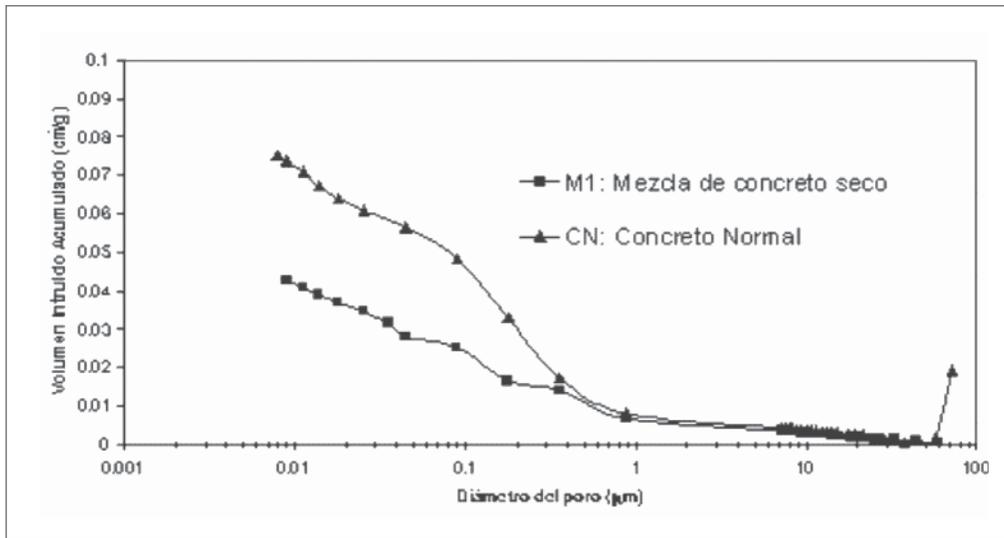


Figura 3. Distribución acumulada tamaño de poro mediante porosímetro de mercurio



Calculando para cada una de las mezclas la resistencia a la compresión en función de la porosimetría, de acuerdo a los modelos propuestos por Kumar y Bhattachrjee (2003) y con porosidades obtenidas en el porosímetro de mercurio, de 6,3 % y 5.8 % respectivamente para M1 y CN, se obtuvo la siguiente tabla (Tabla 6)

Tabla 6. Resistencia de las muestras M1 y CN en función de la porosidad

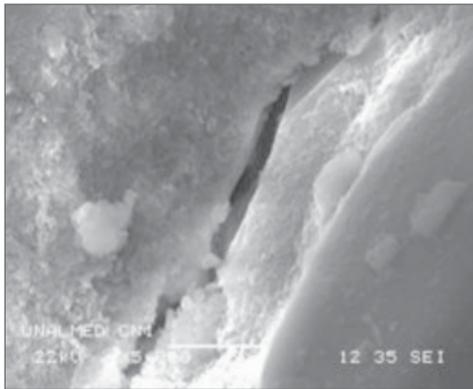
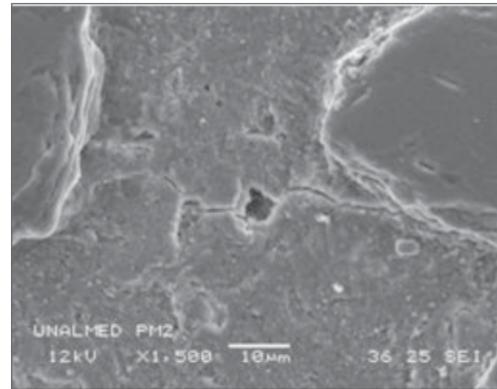
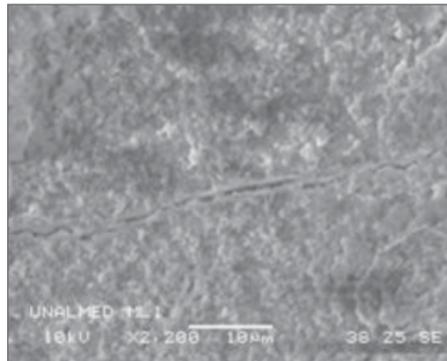
Modelo	Resistencia a la compresión MPa	
	M1 (p= 6,3 %)	CN (p= 5,8 %)
Balshin	40,4	42,2
Ryskovich	42,3	44,2
Schiller	55,9	58,9
Hasselman	39,0	40,1

Fuente: Kumar, R. y Bhattachrjee, B (2003). "Porosity, size distribution of pore an insitu strength in concrete" En: *Cement and Concrete Reseach*. No. 33. pp. 155-164.

Adicionalmente, si se calcula la resistencia a la compresión del adoquín M1 en función de su módulo de rotura como lo propone Marshalls (1994) el resultado es relativamente similar al propuesto por el modelo de Ryskovich.

$$f'c \approx \frac{MR}{0.12} \quad (\text{Según Ryskovich}) \quad \Rightarrow \quad f'c \approx \frac{5.2MPa}{0.12} = 43MPa$$

Al utilizar un microscopio electrónico de barrido para complementar el análisis de los resultados, se puede observar en las microfografías las fisuras que se presentan en los concretos secos (Figura 4).

Figura 4. Microestructura en SEM**CN****PM****ML1**

Existe una diferencia en las microestructuras de las mezclas. La microestructura con polvo de ladrillo, tiene una morfología diferente y no se observa porosidad, tan acentuada como en la Figura 2, observándose que a nivel más interno, no hay grandes diferencias en su porosidad, lo que coincide con el estudio de porosimetría. Además, a pesar de ser tan secas estas mezclas, se muestra una buena hidratación al interior de los poros, lo que favorece la ganancia de resistencia.

Las fisuras en las mezclas se presentan por retracción de las mismas; sin embargo éstas tienden a cerrarse debido al crecimiento de gel alrededor de las grietas. Esta es una razón más para mantener un buen curado de los elementos vibrocompactados.



Conclusiones

A pesar de tener menos contenido de cemento, las mezclas de concreto seco para fabricar adoquines son tan resistentes como los concretos normales.

Por medio del porosímetro de mercurio se encuentra que los concretos secos tienen mayor porosidad, pero el incremento no afecta la resistencia del elemento.

Por medio de la microfotografía, se observa alguna diferencia de porosidad a nivel macroscópico, entre los concretos secos y los convencionales. A nivel microscópico los concretos son muy parecidos, solamente en diámetros de poro menores a 0,3 μm se comienza a encontrar alguna diferencia.

El polvo de mármol ayuda tanto a la resistencia como a la absorción, pues actúa como llenante de los vacíos más pequeños. El polvo de ladrillo tiende a presentar una leve caída en ambas especificaciones.

Bibliografía

Diamond, S.; Lachowski, E. (1980). "On the morphology of Type III C-S-H gel". En: *Cement and Concrete Reseach*. Vol 10. No 5. pp 703- 705.

Jaegermann, C. H.; Pundak, B. y Ravina, D. (1978). *Métodos de curado acelerado para elementos de hormigón prefabricados en un clima cálido*. Israel.

King, Marianne (1995). "Mejores aditivos significan mejores bloques". En: *Cemento – Hormigón*. No. 778.

Kumar, R. y Bhattachrjee, B (2003). "Porosity, size distribution of pore an insitu strength in concrete" En: *Cement and Concrete Reseach*. No. 33. pp. 155-164.

Lange, Davis; Ford, H. Y Werner, A. (1999). "Micro structural investigation of mortar unit interaction". En: *The masonry Society Journal Boulder*. Vol. 17. No. 17. pp. 31-42.

Marchand, J. et. al. (1996) "The microstructure of dry concrete products". En: *Cement and Concrete Research*. Vol. 26. pp. 427-437.

Marshalls, Mono. (1994). "Tensile splitting, flexural, and compressive test for concrete block pavers". En: *Institute for building materials and structures*. TNO IBBC – B - 89-318.

Paakinen, Ilmari (1986). "Intensive Compaction Tester: Device for testing the compactability of no slump concrete" En: *Nordic Concrete Research*. Oslo. pp 109-116.

Pfeiffenberger, L. E. (1987). "Hihgth Strength Block for Enginnered Masonry Structures Part II." En: *Besser Block*. pp. 9 – 11.

_____ (1984). "Shrinkage of Concrete Masonry units with Curren Manufacturing Procedures". En: *Besser Block*. pp. 4 – 5.

Piernas, R.; Sidney, J. y Menossi, R. (2002) "Blocos de Concreto: A Busca de um traço otimizado". En: *Revista Ibracon*. No. 29.

Shimomura y Maekawa (1997). "Analysis of the drying shrinkage bahaviour of concrete using a micromechanical base on the micropore structure concrete" En: *Magazine of Concrete Reseach*. No. 181. pp 303-322.

Wiering, Hans y Juvas, Klaus (1990). "Experiences in measuring archeological properties of concrete having workability from high to no slump". En: *Propeties of Fresh Concrete: Proceedings of Rilem colloquium*. London. pp. 179-186.