

Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón. Resultados tendientes a validar el ensayo en medio adoquín

P. Vila^{*1}, M. N. Pereyra¹, Á. Gutiérrez¹

*Autor de Contacto: pvila@fing.edu.uy

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.186>

Recepción: 24/02/2017 | Aceptación: 11/08/2017 | Publicación: 29/09/2017

RESUMEN

Con el objetivo de validar el ensayo de resistencia a la compresión en medio adoquín para el control de calidad, se analizaron experimentalmente adoquines enteros y medios adoquines en un total de 24 lotes de producción. El resultado en adoquín entero fue mayor que en medio adoquín, siendo posible relacionarlos mediante un factor de forma. Si bien el estudio se limitó a un rango de resistencia y a una única forma y espesor, se comprobó que es posible ensayar medio adoquín para el control de calidad de estos elementos. Esto permitiría utilizar la otra mitad para otro ensayo, simplificando los controles de obra con una menor cantidad de adoquines y la posibilidad de utilizar prensas de menor capacidad.

Palabras clave: control de calidad; adoquines de hormigón; resistencia a la compresión; factor de forma.

Citar como: P. Vila, M. N. Pereyra, Á. Gutiérrez (2017), “Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón. Resultados tendientes a validar el ensayo en medio adoquín”, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 247-261, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.186>

¹ Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2018.

Compressive strength in concrete paving blocks. Results leading to validate the test in half-unit specimens.

ABSTRACT

With the purpose of validating the compressive strength test result on half-unit specimen for concrete paving blocks quality control, experimental results on half-unit and whole unit blocks from 24 production batches were analyzed. The compressive strength results in whole unit was greater than in half-unit specimen, but they are connected by a form factor. Although the study was limited to a range of resistance in a single block shape and thickness, it could be established that it is possible to test half-unit units for quality control. This allows the other specimen half to be used for another test, simplifying the work controls in a smaller quantity of paving blocks needed and the possibility of using presses of lower capacity.

Keywords: quality control; concrete paving blocks; compressive strength; form factor.

Resistência à compressão de pavimentadoras de concreto. Resultados que tendem a validar o teste em um meio de pavimentação

RESUMO

Para validar o teste de resistência à compressão em meio de pavimentação para controle de qualidade, blocos de pavimentos inteiros e meio foram analisados experimentalmente em um total de 24 lotes de produção. O resultado em cobblestones inteiros foi maior do que na metade da cob, sendo possível relacioná-los por meio de um fator de forma. Embora o estudo tenha sido limitado a uma variedade de força e uma forma e espessura únicas, verificou-se que é possível testar meio pavimento para o controle de qualidade desses elementos. Isso permitiria que a outra metade fosse usada para outro teste, simplificando os controles de trabalho com um menor número de pavers e a possibilidade de usar pressões de menor capacidade.

Palabras clave: controle de qualidade; Pavers de concreto; resistência à compressão; fator de forma.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia y objetivo del estudio

Los adoquines de hormigón son elementos prefabricados que constituyen la capa de rodadura de los pavimentos articulados. En Uruguay la normativa UNIT 787 (1989) “*Adoquines de hormigón de cemento portland*” proporciona los requisitos necesarios para el control de calidad de los mismos, incluyendo: características de los materiales utilizados para su fabricación, características geométricas y de aspecto, resistencia a la compresión, resistencia al desgaste y absorción.

Hoy en día se producen adoquines de distintas formas y espesores, en Uruguay habitualmente son rectangulares o Tipo Unistone de 60mm, 80mm o 100mm de espesor (en los casos de pavimentos con circulación de vehículos especiales o pesados, como ser en zonas de puertos y aeropuertos debe ser mayor o igual a 80mm).

Para la determinación de la resistencia a la compresión, la norma UNIT 787 establece como procedimiento de ensayo el indicado en la norma UNIT 101 (1998). Se deben ensayar al menos tres ejemplares y salvo que la sección transversal sea superior a 260cm^2 , el ensayo se realiza en adoquines enteros (si lo excede, la pieza podrá ser cortada) (UNIT 787, 1978). En Uruguay los adoquines fabricados no superan ese valor, por lo tanto, siempre son ensayados ejemplares enteros.

Para el control de calidad, la producción de adoquines se divide en lotes, conformado cada uno por no más de 5000 adoquines. A su vez, en cada lote, la muestra para ensayo debe incluir nueve adoquines (tres para el ensayo de resistencia a la compresión, tres para el ensayo de absorción y tres para el ensayo de desgaste). En una jornada normal de trabajo, la empresa que suministra los adoquines puede llegar a producir hasta 19000 piezas diarias (equivalente a una superficie de pavimento de aproximadamente 380m²), por lo tanto, será necesario extraer y ensayar cerca de 36 adoquines para realizar el control de calidad de los mismos.

El presente artículo se enmarca en el trabajo de revisión y actualización de la normativa uruguaya de adoquines que el Instituto de Estructuras y Transporte (IET) de la Facultad de Ingeniería (Udelar) lleva adelante. Uno de los temas de revisión es la cantidad de adoquines necesarios para los ensayos, la cual en la práctica resulta excesiva para un control de obra. Se estudia aquí la posibilidad de que todos los ensayos (compresión, absorción y desgaste) surjan de un mismo adoquín, lo que implicaría la reducción de la cantidad de adoquines a un tercio. En esta línea, el presente trabajo tiene como objetivo validar el ensayo de resistencia a la compresión en medio adoquín (adoquines aserrados por su eje menor), comparando los resultados experimentales obtenidos ensayando adoquines enteros y medios adoquines para un total de 24 lotes de producción. La principal diferencia entre el adoquín entero y el medio adoquín es su largo, y dado que en la bibliografía no existen coeficientes de conversión específicos que permitan normalizar el resultado del ensayo a un único largo de adoquín, el presente trabajo analiza este aspecto.

Para una misma resistencia, los adoquines enteros presentan una superficie transversal de aproximadamente el doble que el medio adoquín, por lo tanto, la carga máxima suministrada por la prensa debe ser de aproximadamente el doble que la necesaria para medio adoquín (por ejemplo, para 45MPa, la carga máxima es del orden de 1100kN para adoquín entero y 550kN para medio adoquín). Si bien hoy en día la capacidad máxima de las prensas no resulta ser una limitante, da la posibilidad de utilizar prensas de menor capacidad, como las que aún se disponen en algunas obras. Además, ensayar medio adoquín da la posibilidad de hacer el ensayo en menos tiempo.

Cabe destacar que en la normativa internacional vigente para el control de calidad de adoquines de hormigón (ASTM C936, 2016; BS EN 1338, 2003; IRAM 11656, 2010; ICONTEC 2017, 2004; NTON 12 009, 2010), solamente la ASTM C936 (según los procedimientos de ensayos indicados en la ASTM C140, 2017) y la NTON 12 009 consideran la resistencia a la compresión dentro de sus requisitos. Ambas, en recientes actualizaciones han introducido un factor de corrección del resultado cuando se ensayan adoquines de distinta relación espesor/ancho. Sin embargo, no hace mención cuando se ensayan elementos de igual relación espesor/ancho y se modifica su largo como es el caso entre el adoquín entero y medio adoquín.

1.2 Influencia de la restricción de los platos de carga asociada a la forma del elemento sobre el resultado del ensayo de resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión surge del cociente entre la carga máxima del ensayo (carga de rotura por compresión) y la superficie transversal del elemento ensayado. Por lo tanto, para elementos fabricados de un mismo hormigón, sometidos a un mismo proceso de compactación y curado, las diferencias en el resultado del ensayo sólo deberían ser aleatorias, propias del proceso de producción. Sin embargo, esto no ocurre, algunos factores relacionados al propio ensayo y a la condición del elemento previo al ensayo, podrían afectar el resultado (Cánovas, 2007; Bazant, 2000; Neville, 2011; Newman y Choo, 2003; Lamond y Pielert, 2006).

Dentro de estos factores se encuentra el efecto de restricción de los platos de carga sobre el elemento a ser ensayado. Estos, generan una restricción lateral al movimiento sobre la superficie del elemento que, dependiendo de su esbeltez y/o geometría, podría afectar el resultado del ensayo. Esta restricción depende del coeficiente de fricción entre la superficie del elemento y el plato de

carga (que a su vez depende del encabezado utilizado) y de la sección del elemento (Indelicato y Paggi, 2008; Van Vliet y Van Mier, 1995; Van Mier et. al., 1997; Barbosa et al., 2010).

Para elementos de baja esbeltez el efecto de restricción (Figura 1) se puede constatar por la diferencia entre la deformación lateral que sufre el elemento cuando está sometido a la restricción de los platos de carga (sometido a un esfuerzo de compresión σ_1 y un esfuerzo de fricción τ_{12}) (Figura 1a) y cuando no lo está (sometido únicamente a σ_1 , por ejemplo, interponiendo una lámina de teflón entre la superficie engrasada del elemento y los platos de carga) (Figura 1b). Esta restricción al movimiento junto con una baja esbeltez influye sobre el resultado de resistencia a la compresión del ensayo (Barbosa et al., 2010).

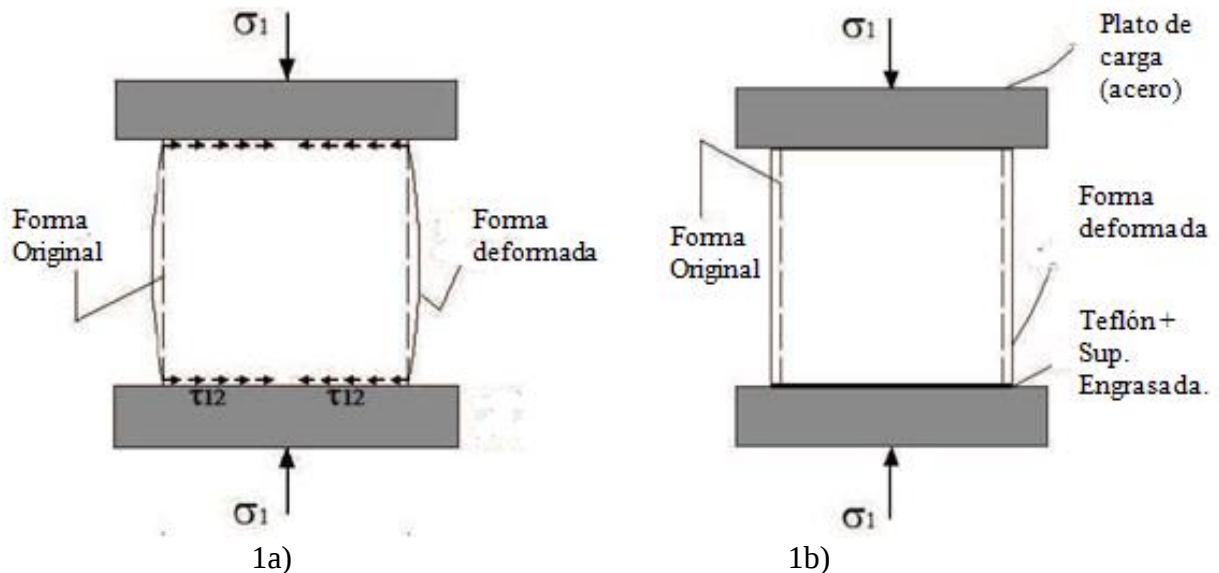


Figura 1. Efecto de restricción de los platos de carga sobre elementos de baja esbeltez. Figura 1a): apoyo directo de los platos de carga. Figura 1b): interponiendo una lámina de teflón sobre la superficie engrasada) (extraído de Barbosa et al., 2010).

Para elementos de sección cilíndrica, el coeficiente de esbeltez se define como el cociente entre la altura y su diámetro y para elementos de sección cuadrada (o rectangular), se define como el cociente entre la altura y su ancho. Por lo tanto, considerando el efecto de restricción de los platos de carga y para elementos de baja esbeltez, el resultado del ensayo debería ser ajustado a un valor normalizado de resistencia, independiente de la forma o tamaño del elemento ensayado. Se citan algunas referencias donde son indicados estos coeficientes: ASTM C42 (2012); ASTM C140 (2017); BS EN 12504-1 (2009); UNIT-NM 69 (1998); IM (2001).

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para el estudio fueron analizados adoquines de distintas partidas de producción (denominados lotes) de una empresa local, extraídos aleatoriamente de un total de 24 lotes.

Los adoquines de hormigón son elementos fabricados con arena terciada, gravillín 2-5 mm, piedra partida gris 5-14 mm, cemento portland normal y agua. El hormigón se vierte en los moldes en una vibro-prensa, equipo que los vibra y compacta automáticamente hasta obtener las dimensiones y densidad deseada. Las proporciones, así como la presión de la vibro-prensa dependen de la resistencia que se desee obtener en cada uno de los lotes. Son curados en hornos de vapor y

posteriormente almacenados hasta ser trasladados para su uso en obra, o hasta la fecha de ensayo, posterior a los 28 días de edad.

Los adoquines ensayados presentaron una sección según Figura 2a) (adoquín entero) y Figura 2b) (medio adoquín). Según la forma del adoquín entero fueron identificados como adoquines Tipo Unistone, de 10cm de espesor nominal, bisel en la cara superior y encaje en las caras laterales (Figura 2c)).

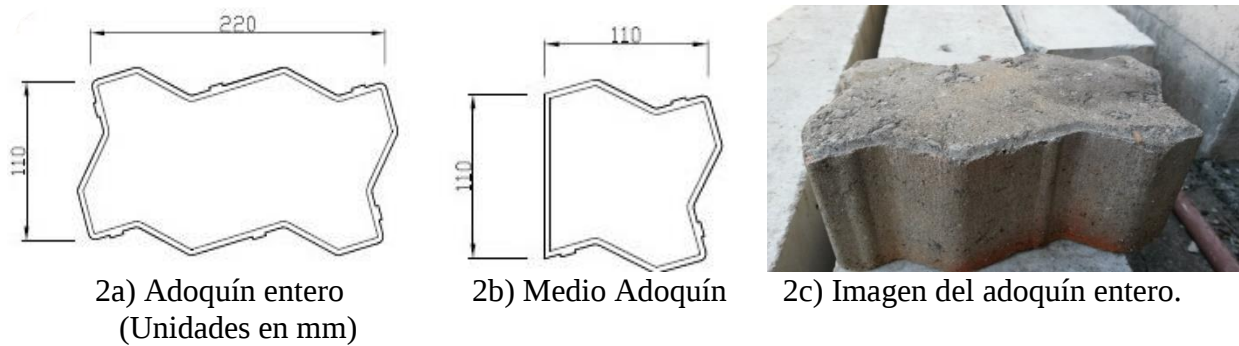


Figura 2. Sección del adoquín entero (2a) y medio adoquín (2b), e imagen de los adoquines ensayados (2c).

Para determinar la resistencia a la compresión los adoquines fueron ensayados según el procedimiento de ensayo de la Norma UNIT-NM 101 (1998) en condiciones naturales de humedad. Los ejemplares destinados al ensayo sobre medio adoquín fueron previamente aserrados por su eje menor, utilizando una sierra de disco diamantado.

Entre los platos de carga de la prensa y la superficie del adoquín, se colocó en todos los casos tablillas de madera de compensado tipo MDF (madera de densidad media) para una mejor distribución de la carga. La prensa utilizada fue de Marca MATEST Modelo C056P122, con una capacidad de carga de 2000kN con control de velocidad de carga (velocidad promedio de carga para los ensayos 0,25 MPa/s).

2.2 Metodología

Fueron ensayados a compresión 4 adoquines enteros y 4 medios adoquines de cada lote. Con el resultado de carga máxima del ensayo y dividiendo por la sección nominal del ejemplar se calculó la resistencia a la compresión individual de cada adoquín (identificada como f_{ind_entero} y f_{ind_medio}). La sección nominal (S_{Nadoq}) para cada tipo de adoquín se determinó como el producto de sus dimensiones nominales indicadas en Figura 2a) y 2b).

Dado que la profundidad del bisel fue mínima en relación con la altura del elemento ensayado (aprox. 5mm de bisel, contra una altura nominal de 100mm) se despreció la disminución de la sección superior del adoquín por la presencia del mismo, no considerándose para el cálculo de la sección transversal.

El resultado de resistencia por lote para cada tipo de adoquín (adoquín entero y medio adoquín) se calculó como el promedio de los resultados individuales válidos por lotes (identificado como f_{exp_entero} para adoquín entero y f_{exp_medio} para medio adoquín). Para validar los resultados individuales se adoptó el criterio de rango máximo (r_{max}) que surge de la metodología propuesta por el Reglamento Argentino CIRSOC 201 (2005) para el control de conformidad del hormigón a partir de probetas cilíndricas. Se calculó el recorrido r como la diferencia entre el valor individual máximo (f_{ind_max}) y el valor individual mínimo (f_{ind_min}) dividido por el promedio de los resultados

por lote y por tipo de adoquín (f_{exp}) según la ecuación (1). El valor de r se limitó a un 20% del valor promedio f_{exp} según ecuación (2) para ambos tipos de adoquines.

$$r = \frac{(f_{ind_max} - f_{ind_min})}{f_{exp}} \quad (1)$$

$$r \leq r_{max} = 0,2 * f_{exp} \quad (2)$$

En los lotes en que r fue mayor al 20% se descartó el resultado individual más apartado, volviéndose a calcular r con los valores individuales restantes, verificándose nuevamente y calculándose el nuevo promedio por lote (f_{exp_entero} para adoquín entero y f_{exp_medio} para medio adoquín).

Los adoquines ensayados fueron extraídos aleatoriamente de cada uno de los lotes de producción, pertenecientes a un mismo hormigón, sometidos a un mismo procedimiento de curado, de almacenamiento y ensayados en condiciones similares (humedad en el momento del ensayo, en una única prensa, a igual velocidad de carga e igual encabezado). Ambos presentaron la misma altura para el ensayo (correspondiente al espesor del adoquín) y el mismo ancho. Sin embargo, el largo fue diferente, considerándose ésta la principal diferencia entre ambos.

Como no se cuenta con coeficientes específicos para elementos de sección rectangular que permitan normalizar el resultado del ensayo a elementos de un único largo, fueron considerados los coeficientes que surgen de la bibliografía para elementos cilíndricos de hormigón (ASTM C42, 2012; BS EN 12504-1, 2009; UNIT-NM 69, 1998; IM, 2001). Para lo cual se definió el diámetro equivalente d_{eq} , según ecuación (3), parámetro que corresponde al diámetro de una sección circular de igual área que la sección transversal nominal de los adoquines S_{Nadoq} .

Este parámetro d_{eq} permitió considerar la variación en la superficie de apoyo de los platos de carga al modificar el largo de la sección transversal del adoquín y de esta forma considerar su influencia sobre el resultado del ensayo.

A partir del diámetro equivalente d_{eq} y el espesor e del adoquín se calculó la esbeltez equivalente a elementos cilíndricos $\lambda_{eq,cil}$, según ecuación (4).

$$S_{Nadoq} = \pi * \frac{d_{eq}^2}{4} \quad \rightarrow \quad d_{eq} = 2 * \sqrt{\frac{S_{Nadoq}}{\pi}} \quad (3)$$

$$\lambda_{eq,cil} = \frac{e}{d_{eq}} \quad (4)$$

El coeficiente $\lambda_{eq,cil}$ permitió obtener el resultado de resistencia normalizado a elementos cilíndricos de esbeltez 2 (multiplicando el resultado del ensayo por el valor k que surge de la referencia IM de la Tabla 1).

Fueron escogidos los valores de k que surge de la referencia IM ya que estos permiten considerar coeficientes de ajuste para una esbeltez $\lambda < 1$ (como es el caso de los adoquines analizados). Estos coeficientes son los utilizados para testigos extraídos de pavimentos de hormigón donde son admitidos valores de λ hasta 0,5. Según Cánovas (2007) y Neville (2011), para elementos de baja esbeltez, el resultado del ensayo se ve fuertemente afectado por la restricción de los platos de carga

de la prensa, motivo por el cual, la mayoría de las normas limitan el ensayo a una esbeltez $\lambda \geq 1$ (como se observa en la Tabla 1).

Tabla 1. Valores del coeficiente de conversión de resistencia k tomados de la bibliografía (valor de referencia $\lambda = 2$).

Referencia	Esbeltez λ (altura/diámetro)						
	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
ASTM C 42, 2012	-	-	0,87	0,93	0,96	0,98	1,00
BS EN 12504-1, 2009	-	-	0,80	0,87	0,92	0,97	1,00
UNIT-NM 69, 1998	-	-	0,87	0,93	0,96	0,98	1,00
IM, 2001	0,50	0,70	0,85	0,90	0,94	0,95	1,00

En la Tabla 2 se resumen los datos geométricos para cada tipo de adoquín, así como d_{eq} , $\lambda_{eq,cil}$ y los valores de k (k_1 para adoquín entero y k_2 para medio adoquín) adoptados según la esbeltez equivalente $\lambda_{eq,cil}$ (se aplicó linealidad entre los valores de λ de IM de la Tabla 1).

Tabla 2. Características de los adoquines ensayados.

Tipo de adoquín	Espesor Nominal (e)	Sección transversal nominal ($S_{Nadoq.}$)	Diámetro equivalente (d_{eq})	Esbeltez equivalente ($\lambda_{eq,cil}$)	Factor de conversión por esbeltez (k)
	(cm)	(cm ²)	(cm)	-	-
Adoquín entero	10	242	17,55	0,57	$k_1 = 0,56$
Medio adoquín	10	121	12,41	0,81	$k_2 = 0,74$

(Nota: los datos geométricos de los adoquines son valores nominales, considerando al medio adoquín aserrado por su eje menor.)

Para cada uno de los lotes analizados, a partir de los valores experimentales de resistencia promedio de adoquín entero (f_{exp_entero}) y resistencia promedio de medio adoquín (f_{exp_medio}) y utilizando el factor k_1 y k_2 de la Tabla 2, se calcularon los valores de resistencia en adoquín entero y medio adoquín normalizados a elementos cilíndricos de esbeltez 2 (identificado como f_{k1_entero} y f_{k2_medio}), según la ecuación (5) y ecuación (6):

$$f_{k1_entero} = 0,56 * f_{exp_entero} \quad (5)$$

$$f_{k2_medio} = 0,74 * f_{exp_medio} \quad (6)$$

En resumen, el procedimiento se basó en analizar las diferencias entre los resultados experimentales de resistencia del adoquín entero y del medio adoquín para cada uno de los lotes. En caso de existir una diferencia significativa entre los resultados, se adoptó como hipótesis que la principal diferencia fue consecuencia del cambio del largo de los adoquines ensayados. Luego, al aplicar un factor de conversión que permitió normalizar el resultado a un mismo tamaño de

elemento, se analizó cuan significativas fueron las diferencias resultantes (se muestra esquema de trabajo en Figura 3).

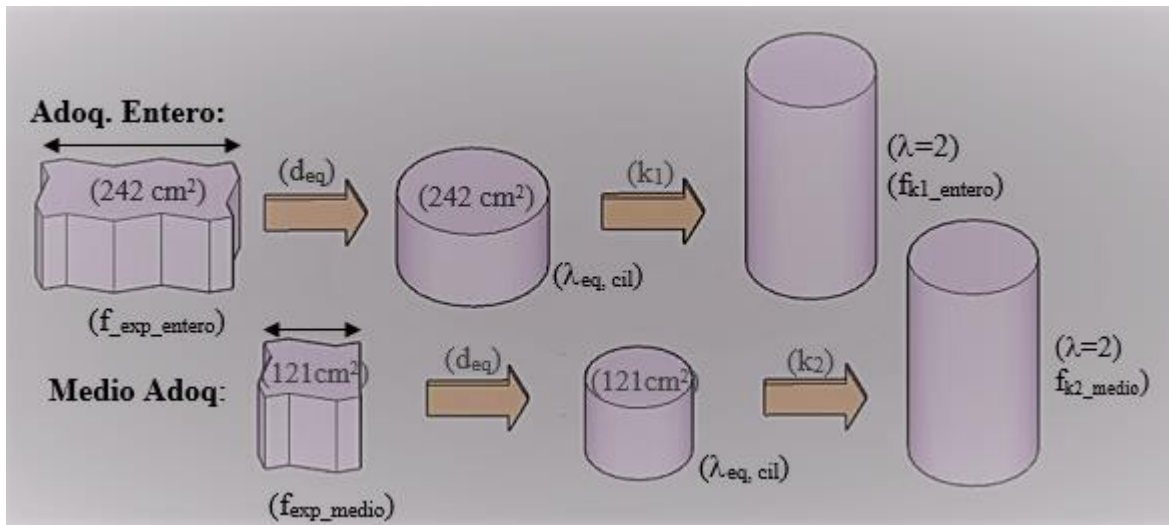


Figura 3. Esquema del análisis.

Si las diferencias entre los resultados normalizados a un mismo tamaño de elemento (para $\lambda = 2$) no son significativas, la hipótesis considerada es verdadera. Esta metodología de análisis surge del trabajo del ICPI (Interlocking Concrete Pavement Institute) y el NCMA (National Concrete Masonry Association) para la determinación de los coeficientes indicados en la Norma ASTM C140 para elementos prismáticos (Wallock et al., 2014). En este trabajo se analizó qué tan significativas son las diferencias en los resultados aplicando los coeficientes de ajuste correspondientes.

Para poder vincular los resultados experimentales se define el coeficiente k_{exp_adoq} , como el cociente entre los resultados de resistencia de adoquín entero y medio adoquín, según la ecuación (7). De forma similar se define el coeficiente k_{fk_adoq} como el cociente entre las resistencias normalizadas a esbeltez 2, según la ecuación (8).

$$k_{exp_adoq} = \frac{f_{exp_entero}}{f_{exp_medio}} \quad (7)$$

$$k_{fk_adoq} = \frac{f_{k1_entero}}{f_{k2_medio}} \quad (8)$$

Se utilizó la prueba T-Test de medias que permite analizar las diferencias entre la resistencia promedio de adoquín entero (f_{exp_entero}) y la resistencia promedio en medio adoquín (f_{exp_medio}) para cada uno de los lotes. La hipótesis nula H_0 considera que ambos valores promedios pertenecen a un mismo grupo de resistencias. Si se rechaza H_0 , con un nivel de certeza del 95% ($p\text{-valor} < 0.05$) ambos promedios son diferentes y por lo tanto la resistencia en adoquín entero es diferente del medio adoquín para cada uno de los lotes.

Por último, se graficaron los resultados experimentales de resistencia a la compresión en adoquín entero en función de los resultados experimentales en medio adoquín (f_{exp_entero} vs f_{exp_medio}). Se adoptó un modelo de correlación lineal y un modelo polinómico de segundo orden (ambos sin término independiente) y se analizó el ajuste por mínimos cuadrados a los datos experimentales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resistencia a la compresión: resultados experimentales y resultados normalizados a un único tamaño de elemento.

En la Figura 4a) se observa un ejemplar de adoquín entero listo para su ensayo, en la Figura 4b) la forma de rotura típica que presentó el adoquín entero y en la Figura 4c) la forma de rotura típica en medio adoquín.

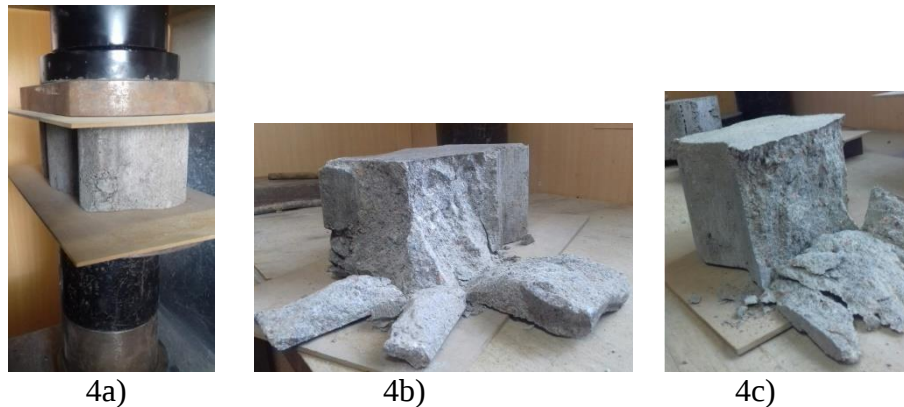


Figura 4. Imagen de adoquín entero listo para ensayo (4a), rotura típica de adoquín entero (4b) y rotura típica de medio adoquín (4c).

Como se mencionó en la Introducción (ítem 1.2), para elementos de baja esbeltez, toda la altura del elemento quedará afectada por la restricción de los platos de carga de la prensa. Este efecto se puede constatar durante el ensayo por la formación de los denominados “conos” o forma de rotura “troncocónica”, en la cual, el elemento fallará adoptando esa forma de rotura (Van Vliet y Van Mier, 1995). En el caso específico de los adoquines, en ambos casos se observó este tipo de falla, por lo tanto, toda la altura del adoquín estuvo sometida al efecto de restricción de los platos de carga.

El gráfico de los resultados experimentales de resistencia en adoquín entero y en medio adoquín permitió visualizar la evolución de la resistencia de los lotes ensayados (Figura 5). Allí se indican los valores promedio por lote (f_{exp_entero} y f_{exp_medio}) y los resultados individuales máximo y mínimo en cada lote para ambos tipos de adoquines ($f_{ind_entero_max}$ y $f_{ind_entero_min}$ para adoquines enteros y $f_{ind_medio_max}$ y $f_{ind_medio_min}$ para medios adoquines). Los resultados están expresados en MPa.

La resistencia en adoquín entero f_{exp_entero} presentó un valor máximo de 42,6MPa en el lote 1 y un valor mínimo de 27,5MPa en el lote 12. Para medio adoquín el valor máximo de f_{exp_medio} fue 35,3MPa en el lote 2 y el valor mínimo 19,2MPa en el lote 12.

A pesar de que se obtuvo una elevada variabilidad de los resultados al cambiar el lote de producción (asociado a diferencias en la producción y a un escaso control de calidad en la fabricación de los adoquines), en el gráfico de la Figura 5 se puede observar que en cada lote f_{exp_entero} fue mayor que f_{exp_medio} . Estas diferencias fueron analizadas mediante la prueba T-Test de media, considerando como hipótesis nula H_0 que f_{exp_entero} fue igual a f_{exp_medio} en cada lote. En todos los casos se obtuvo un p-valor $< 0,05$, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y con un grado de certeza del 95% se confirma estadísticamente que los resultados en adoquín entero y medio adoquín fueron diferentes.

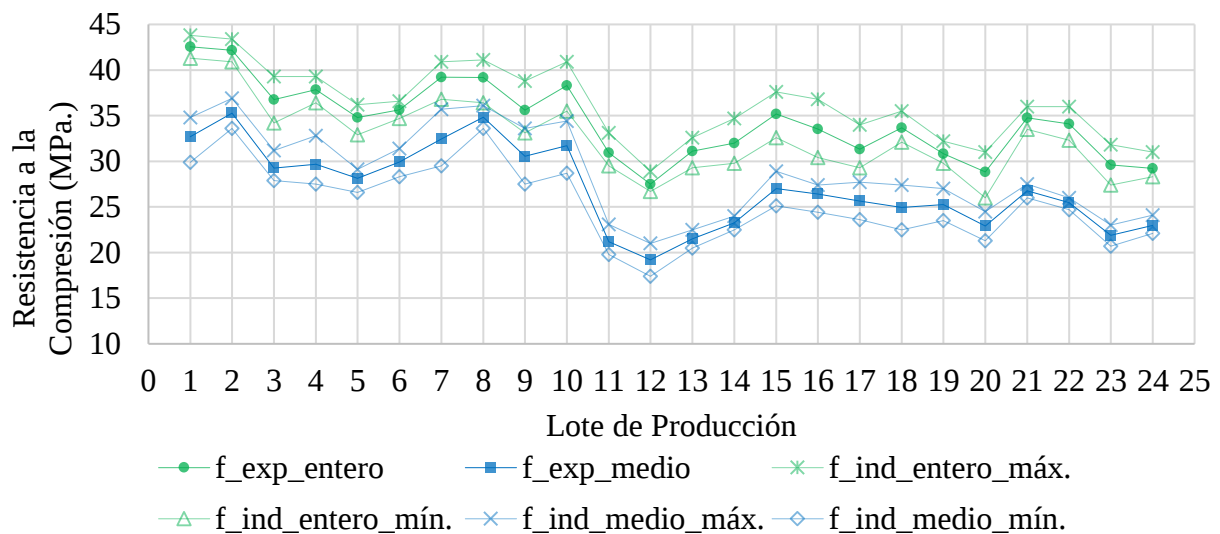


Figura 5. Evolución de los resultados experimentales de resistencia a la compresión de los adoquines por lote.

Además de que los resultados de f_{exp_entero} y f_{exp_medio} fueron diferentes, graficando f_{exp_entero} vs f_{exp_medio} se puede observar que existe una relación entre ambos, cuando aumenta la resistencia en medio adoquín, aumenta la resistencia en el adoquín entero (Figura 6). Se grafica la recta $y = x$ que permite tener una referencia con los valores que presentan la ordenada igual a la abscisa.

Ya que se asume que la principal diferencia entre ambos tipos de adoquines fue su largo, se analizó la influencia de esta variable en el resultado del ensayo a compresión. Aplicando la ecuación (3) se obtuvo el diámetro equivalente d_{eq} para cada tipo de adoquín y se calculó la esbeltez equivalente $\lambda_{eq,cil}$ según (4). A partir de este parámetro y de los coeficientes que surgen de la bibliografía (coeficientes IM de la Tabla 1) se obtuvo el resultado de resistencia normalizado para ambos tipos de adoquines (f_{k1_entero} y f_{k2_medio} según ecuaciones (5) y (6)).

Al normalizar el resultado de resistencia a elementos de igual tamaño se obtuvieron resultados similares: los puntos correspondientes a f_{k1_entero} vs f_{k2_medio} están muy próximos a la recta $y=x$ según se visualiza en el gráfico de la Figura 6. Por lo tanto, la principal diferencia entre los resultados experimentales puede ser asociada al coeficiente considerado.

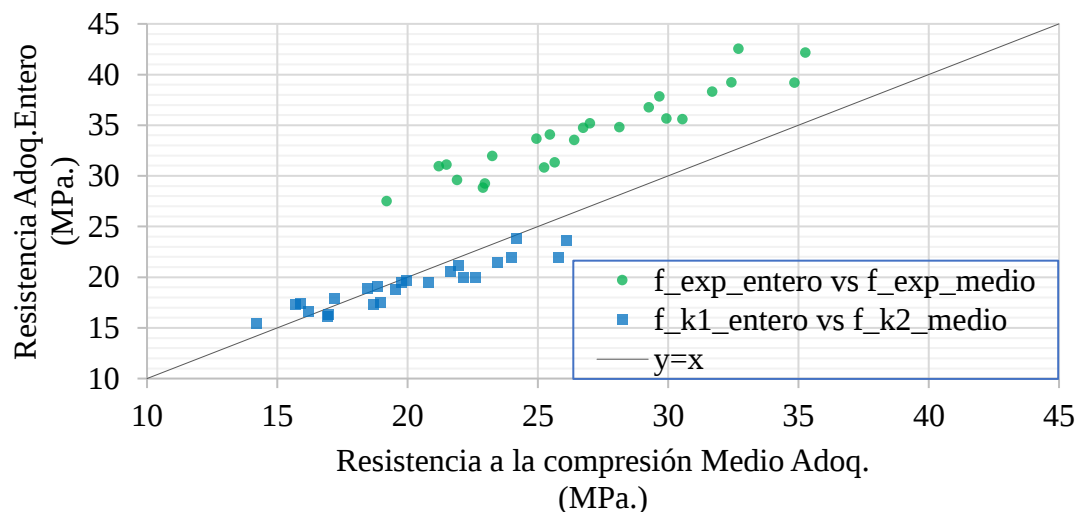


Figura 6. Resistencia a la compresión de adoquines. Valores experimentales y resultados normalizados.

Nan Vliet y Van Mier (1995) ensayaron elementos de sección cuadrada de 10cm x 10cm y una altura comprendida entre 2,5cm y 20cm con dos sistemas de encabezados: apoyo directo sobre la superficie del elemento (elevada fricción como se mostró en Figura 1a)), y otro sistema interponiendo entre ambos una lámina de teflón (baja fricción, en este caso los platos de carga no restringen el movimiento trasversal como se mostró en Figura 1b)). Para un hormigón de resistencia aproximada de 54MPa (en cubo de control de 15cm de arista), sólo en los casos que el elemento estuvo sometido a la restricción de los platos de carga, el resultado del ensayo se vio modificado significativamente al variar la esbeltez del mismo. Las diferencias obtenidas entre las deformaciones transversales en los extremos del elemento y a la mitad de su altura (en el caso de contacto directo) confirman el hecho de la restricción generada por los platos de carga.

Idelicato y Paggi (2010) estudiaron las diferencias en el resultado del ensayo entre elementos cilíndricos (altura/diámetro=2) y cúbicos (altura/lado=1) para diferentes coeficientes de fricción entre los platos de carga y la superficie del elemento. Observaron que las diferencias en el resultado dependen del grado de fricción y por lo tanto de la restricción generada por los platos. Sólo en los casos de una esbeltez igual o mayor a dos el resultado del ensayo no se ve afectado por este hecho. Por lo tanto, para elementos de baja esbeltez (como es el caso de los adoquines) todo el elemento estará sometido a la restricción de los platos de carga (Figura 1a)) y al igual que Nan Vliet y Van Mier (1995) e Idelicato y Paggi (2010), el resultado de resistencia se verá fuertemente afectado por la restricción que se extiende en toda la altura del elemento.

El medio adoquín es un elemento que presenta sus lados similares entre si (aproximadamente 11cm x 11cm), por lo tanto, el coeficiente de ajuste adoptado en el presente trabajo ($k_2=0,74$) está comprendido entre los coeficientes que han sido reportados en la bibliográfica para elementos cúbicos (entre 0,72 y 1,02) (Zabihi y Eren, 2014; Yi, et al., 2006).

Se debe tener en cuenta que los coeficientes de ajuste indicados en la bibliografía son valores promedios que dependen de varios factores, tales como: de la condición de humedad del elemento, del tipo de encabezado, del nivel de resistencia y del módulo de elasticidad del hormigón entre otros (Zabihi y Eren, 2014; ASTM C42, 2012). Dado que el ajuste por los coeficientes de la IM permitió “absorber” las diferencias más significativas entre ambos tipos de adoquines, no se consideró necesario buscar en la bibliografía otros posibles coeficientes de ajuste.

Como ya se mencionó en la Introducción, para elementos prismáticos de hormigón, los coeficientes de normalización de resistencia indicados en la bibliografía sólo consideran la influencia del cociente entre la altura y su ancho. Tal es el caso de la ASTM C140 (2017), Anexo A4, la cual considera el coeficiente de conversión (F_a) para elementos que presentan una relación de aspecto R_a (espesor/ancho) diferente de 0,612 (en éstos el espesor puede variar entre 6cm y 12cm, pero manteniendo una sección constante de ensayo de 9,8cm x 19,8cm). Por lo tanto, las diferencias obtenidas entre los adoquines del estudio no pudieron ser asociadas al coeficiente de esbeltez de esta norma.

Otra diferencia entre ambos tipos de adoquines ensayados fue el aserrado del medio adoquín, pero dado que el coeficiente de esbeltez considerado permitió “absorber” las diferencias de los resultados entre ambos tipos de adoquines, se considera que esta variable no afectó significativamente el resultado del ensayo.

3.2 Influencia del nivel de resistencia en los resultados.

Para analizar la influencia del nivel de resistencia sobre las diferencias obtenidas entre ambos tipos de adoquines, fue definido el coeficiente k_{exp_adoq} , como el cociente entre los resultados experimentales para ambos tipos de adoquines, según ecuación (7). Al graficar k_{exp_adoq} vs f_{exp_medio} (Figura 7) se puede observar que para valores bajos de resistencia el valor de k_{exp_adoq} fue 1,46 (lote 12), pero para niveles más altos de resistencia, el valor de k_{exp_adoq} disminuyó a 1,12 (lote 8), presentando un valor promedio de 1,28.

Para el coeficiente que surge de los valores normalizados de resistencia (k_{fk_adoq} según ecuación (8)) se obtuvo un máximo de 1,1 (lote 11), un mínimo de 0,85 (lote 12) y un valor promedio de 0,97 (Figura 7). Todos los valores estuvieron muy cercanos a la unidad, confirmado de esta forma, la similitud entre los valores normalizados de resistencia (entre f_{k1_entero} y f_{k2_medio}).

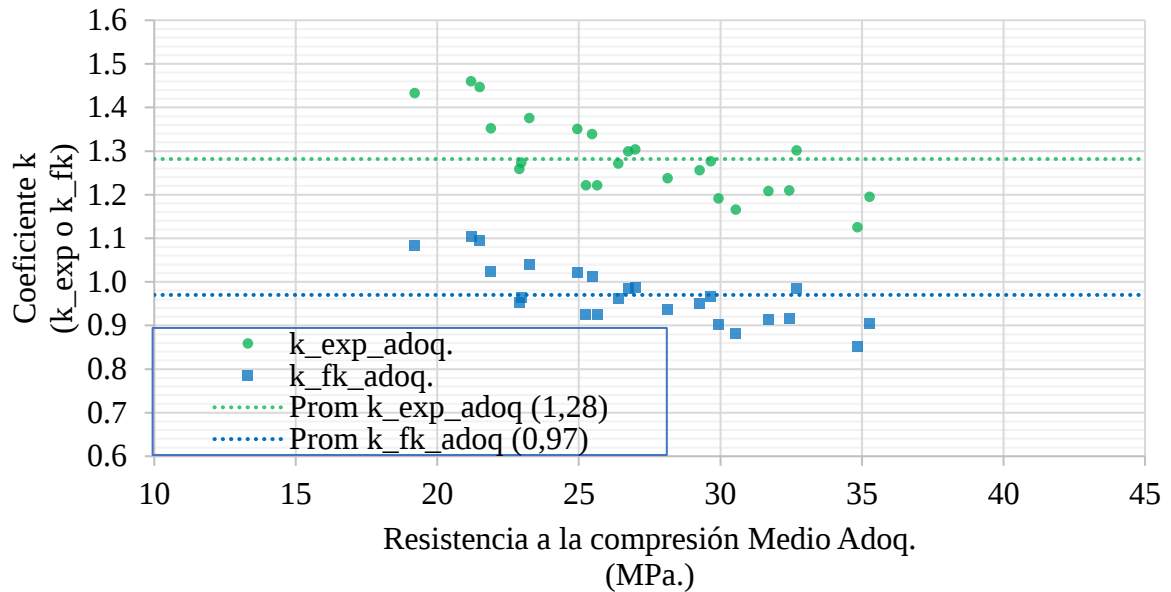


Figura 7. Gráfico de los coeficientes k (k_{exp_adoq} y k_{fk_adoq}) en función del nivel de resistencia.

A partir del coeficiente k_{exp_adoq} se observó que la relación entre los resultados de resistencia en adoquín entero y medio adoquín depende del nivel de resistencia. Para elementos de menor resistencia, las diferencias fueron mayores que para niveles más altos de resistencia. Lo anterior está en acuerdo con la ASTM C42 (2012), que indica que los coeficientes utilizados para hormigones de resistencia normal (entre 14MPa y 42MPa) no deben ser utilizados para hormigones de elevada resistencia donde deberían ser utilizados coeficientes más cercanos a la unidad.

Yi, et al. (2006) mostraron que el factor de conversión de elementos cúbicos (10cm x 10cm x 10cm) a cilíndricos (15cm x 30cm) fue 0,82 para un nivel de resistencia entre 27MPa y 43MPa (considerados hormigones de resistencia normal) y 0,92 para un nivel de resistencia mayor a 66MPa (considerados hormigones de alta resistencia). Una conclusión similar se desprende del trabajo ya citado de Nan Vliet y Van Mier (1995), donde los autores indican que, para hormigones de mayores resistencias, las diferencias entre los resultados fueron menores que para una resistencia de 54MPa.

En todos los casos, al aumentar la resistencia, el hormigón presenta una mayor rigidez y por lo tanto una menor deformación lateral. De esta forma, la restricción al movimiento generado por los platos de carga tiene una menor influencia sobre el resultado del ensayo. Algo similar sucedió con los resultados experimentales de los adoquines que al aumentar la resistencia, el coeficiente k_{exp_adoq} disminuyó (acercándose a la unidad).

3.3 Correlación entre los resultados experimentales de adoquín entero y medio adoquín.

Del análisis realizado en 3.1 se concluyó que la principal diferencia entre los resultados experimentales de adoquines enteros y medios adoquines fue una consecuencia del efecto de restricción generado por los platos de carga de la prensa al modificarse el largo del elemento. Por lo tanto, ambos resultados están correlacionados.

Adoptándose dos modelos de comportamiento (función lineal y polinómica de segundo orden, ambos sin término independiente) se calcularon los coeficientes mediante regresión por ajuste por mínimos cuadrados a los datos experimentales (Figura 8).

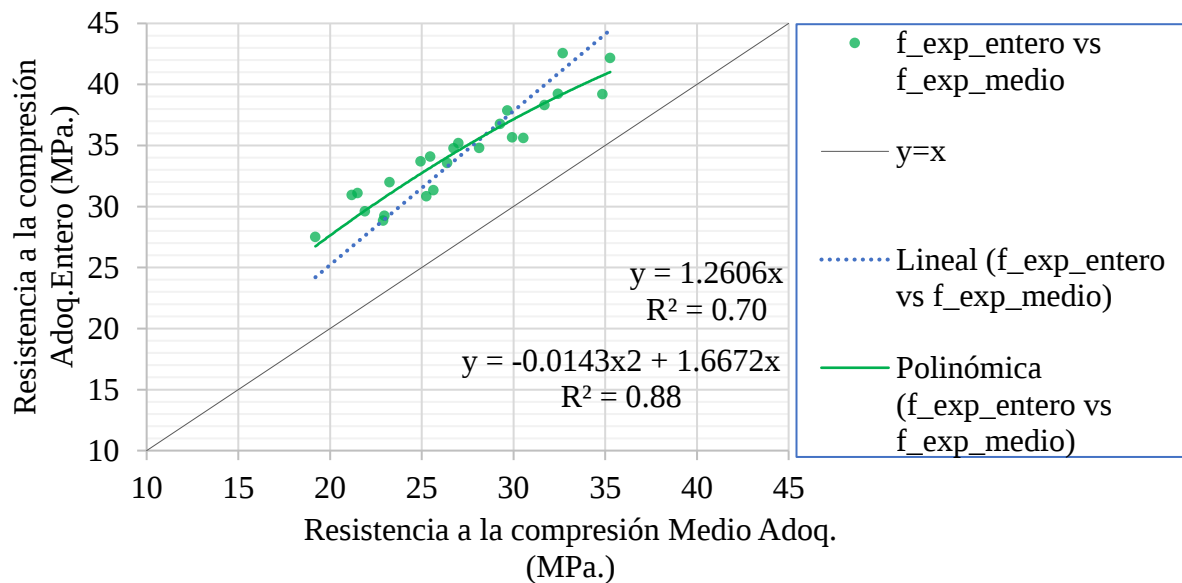


Figura 8. Relación entre resistencia adoquín entero vs medio adoquín y modelos de correlación aplicados.

El modelo de función polinómica de segundo orden sin término independiente presentó un mejor ajuste a los datos experimentales con un r^2 de 0,88, mientras que el modelo lineal presentó un r^2 de 0,70.

Como se indicó en 3.2, cuando la resistencia aumentó, la diferencia entre el resultado de adoquín entero y medio adoquín disminuyó, por lo tanto, el coeficiente que los relaciona varía en función del nivel de resistencia (coeficiente k_{exp_adoq}). De aquí que, para valores mayores de resistencia los puntos en el gráfico f_{exp_entero} vs f_{exp_medio} estén más próximos de la recta $y=x$ (Figura 8). Esto refuerza el hecho de que el modelo de función polinómica presentó un mejor ajuste.

Aplicando la función polinómica se obtuvo un r^2 igual a 0.88, valor muy cercano a 0,90 (valor mínimo aproximado de r^2 para considerar un modelo matemático aceptable para correlacionar ambos resultados). Por lo tanto, para el rango de resistencia del estudio entre 27,5MPa y 42,6MPa en adoquines enteros, se considera que ambos resultados pueden ser relacionados mediante el coeficiente k_{exp_adoq} (según ecuación 7), coeficiente que varió entre 1,46 (para valores más bajos de resistencia) y 1,12 (para valores más altos de resistencia), con un valor promedio de 1,28.

La Norma UNIT 787 vigente indica que el resultado del ensayo, sobre al menos tres ejemplares enteros, debe ser mayor o igual a 35MPa para pavimentos de circulación peatonal y vehicular común y 45MPa para pavimentos de vehículos especiales. Por lo tanto, el trabajo experimental deberá ampliarse permitiendo una mayor cantidad de lotes ensayados (para lograr obtener un modelo matemático de ajuste con un $r^2 > 0,90$) y considerar un rango de resistencias que permita incluir resultados de resistencias mayores.

4. CONCLUSIONES

Para adoquines pertenecientes a un mismo lote (el mismo hormigón e igual procedimiento de fabricación y curado) el resultado del ensayo de resistencia a la compresión en adoquín entero fue mayor que en medio adoquín para todos los lotes analizados. Sin embargo, luego de aplicar un

factor de forma que permitió normalizar el resultado del ensayo a un único tamaño de elemento no se observaron diferencias significativas entre ambos resultados, por lo tanto, se concluye que la principal causa de estas diferencias fue su largo.

Al correlacionar los valores experimentales de adoquín entero y medio adoquín con una función polinómica de segundo orden sin término independiente y ajustando por mínimos cuadrados a los datos experimentales, se obtuvo un r^2 cercano a 0,90, sugiriendo un buen ajuste si se tiene en cuenta el número restringido de lotes testeados y la dispersión de los mismos.

Por lo tanto, a pesar de las limitaciones del trabajo, los resultados sugieren que la resistencia a la compresión podría ser determinada ensayando medio adoquín, validándose así el ensayo sobre este tipo de elementos.

De esta forma se podría utilizar la otra mitad del elemento para otro ensayo, con una menor cantidad de adoquines necesarios y la posibilidad de usar una prensa de menor capacidad, factores estos limitantes para un control de obra.

El rango de resistencia del estudio no abarcó el rango necesario para las diferentes clases de resistencia de la Norma UNIT 787 (de 35MPa y 45MPa) por lo tanto el trabajo deberá ampliarse mediante una campaña de ensayos con una mayor cantidad de lotes, que involucre un rango de resistencias más amplio (junto con otros espesores de adoquines y formas).

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Estructuras y Transporte (IET) de la Facultad de Ingeniería (UdelaR) por el equipamiento y lugar físico necesario para realizar los ensayos, así como a la empresa que suministró los adoquines para el estudio. Se agradece a los revisores anónimos de la revista ALCONPAT, que con sus aportes enriquecieron este trabajo. Y en especial, un agradecimiento al docente P.M. de la Facultad de Ciencias (UdelaR) por su contribución en la metodología para presentar trabajos de divulgación de carácter técnico-científico.

6. REFERENCIAS

- ASTM C140/C140M (2017), “*Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*”, ASTM International, (West Conshohocken), PA, 2017, p. 25, DOI: 10.1520/C0140_C0140M-17, www.astm.org.
- ASTM C42/C42M (2012), “*Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*” ASTM International, (West Conshohocken), PA, 2012, p. 8, DOI: 10.1520/C0042_C0042M-12, www.astm.org.
- ASTM C936/C936M (2016), “*Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units*”, ASTM International, (West Conshohocken), PA, 2016, p. 4, DOI: 10.1520/C0936_C0936M-16, www.astm.org.
- Barbosa, C., Hanai, J., Lourenço, P. (2010), “*Numerical validation of compressive strength prediction for hollow concrete blocks*”, in: 8th International Masonry Conference 201. (Dresden, Germany), pp. 1625-1634. <http://hdl.handle.net/1822/17279>.
- Bazant, Z. (2000), “*Size Effect*”, *International Journal of Solids and Structures*. 37, No.1-2, pp. 69-80.
- BS EN 12504-1 (2009), “*Testing concrete in structures. Cored specimens. Taking, examining and testing in compression*”, British Standards, (London, UK), p. 20. DOI:10.3403/30164918U
- BS EN 1338 (2003), “*Concrete paving blocks. Requirements and test methods*”, British Standards, (London, UK), p. 76. DOI:10.3403/02817150.
- Cánovas, M. (2007), “*Hormigón*”. Octava edición. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (Madrid, España). ISBN: 97838003640.

- CIRSOC 201 (2005), “*Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*”, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, (Buenos Aires, Argentina), p.482.
- Indelicato, F., Paggi, M., (2008) “*Specimen shape and problem of contact in the assessment of concrete compressive strength*”. Materials and Structures, V.41, No.2, pp.431-441. DOI: 10.1617/s11527-007-9256-7.
- IM (2001), “*Pliego general de condiciones para la construcción de pavimentos de hormigón.*”, Intendencia de Montevideo (Montevideo, Uruguay, IM), p. 79.
- IRAM 11656 (2010), “*Adoquines de hormigón para pavimentos intertrabados. Requisitos y Métodos de Ensayo.*”, Instituto Argentino de Normalización y Certificación (Argentina), p. 16.
- Lamond, F, Pielert, J. (2006), “*Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*” ASTM International, STP 169D (USA), p 219.
- Neville A. (2011) “*Properties of Concrete*” 5ta edición. Pearson Education Limited. (Essex, Endgland). p. 846. ISBN: 978-0-273-75580-7
- Newman, J., Choo, B. (2003), “*Advanced concrete Technology. Testing and Quality*”, Elsevier. (Oxford, UK), p.313. ISBN: 0-7506-5106-7.
- ICONTEC 2017 (2004), “*Adoquines de Concreto para Pavimentos*”, Norma Técnica Colombiana, (Colombia), p. 6.
- NTON 12 009 (2010), “*Adoquines de Concreto*”, Comisión de Normalización Técnica y Calidad, Ministerio de Fomento, Industria y Comercio, (Nicaragua), p.13.
- RILEM TC148-SSC (1997), “*Strain-Softening of Concrete in Uniaxial Compression*”. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures. V.30, pp. 195-209.
- UNIT-NM 69 (1998), “*Hormigón. Extracción, preparación y ensayo de testigos de estructuras de hormigón.*”, Instituto Uruguayo De Normas Técnicas (Montevideo, Uruguay, UNIT), p. 12.
- UNIT-NM 787 (1989), “*Adoquines de hormigón de cemento Portland.*”, Instituto Uruguayo De Normas Técnicas (Montevideo, Uruguay, UNIT), p. 5.
- UNIT-NM 101 (1998), “*Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cilíndricas*”, Instituto Uruguayo De Normas Técnicas, (Montevideo, Uruguay), p. 7.
- Van Mier, J., Shah, S., Arnaud, M. et al. (1997), “*Strain-softening of concrete in uniaxial compression*” (RILEM Technical Committees RILEM TC 148-SSC: Test Methods for the Strain-softening Response of Concrete) Materials and Structures V.30, pp. 195-209. DOI:10.1007/BF02486177.
- Van Vliet M., Van Mier, J. (1995), “*Softening Behavior of Concrete Under Uniaxial Compression*”, Fracture Mechanics of Concrete Structures, AEDIFICATIO Publishers (Freiburg, Germany).
- Walloch, C., Lang, N., Smith, D. (2014), “*Compressive Strength Testing of Concrete Paving Units: Research on Configuration of Tested Specimens and Effects of Variables in Specimen Capping*”, (ASTM-STP1577), (USA), pp. 233-262. DOI: 10.1520/STP157720130181.
- Yi, S., Yan, E., Choi, J. (2006), “*Specimen shape and the problem of contact in the assessment of concrete compressive strength*”, Nuclear Engineering and Design V. 236, No. 2 , pp.115-127.
- Zabihi, N., Eren, Ö. (2014), “*Compressive Strength Conversion Factors of Concrete as Affected by Specimen Shape and Size*”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, V.7, No. 20, pp.4251-4257. ISSN: 2040-7459 (e-ISSN: 2040-7467).