

Resistência à compressão de peças de concreto para pavimentação. Resultados que tendem a validar o ensaio em meia peça

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

RESUMO

Com o objetivo de validar a utilização de meias peças de concreto para pavimentação, pavers, no seu controle de qualidade, os resultados de resistência à compressão obtidos nestas meias peças foi comparado aos resultados obtidos no ensaio normalizado e realizado em peças inteiras. Foram analisados experimentalmente um total de 24 lotes de produção. Os resultados obtidos nas peças inteiras foram maiores do que os obtidos nas meias peças, sendo possível relacioná-los por meio de um fator de forma. Embora o estudo tenha sido limitado a uma classe de resistência e uma única forma e espessura, verificou-se que é possível testar meia peça de concreto para o controle de qualidade desses elementos. Isso permitiria que a outra metade fosse usada para outro teste, simplificando os controles de produção com um menor número de peças e a possibilidade de usar prensas de menor capacidade.

Palavras-chave: controle de qualidade; peças de concreto; resistência à compressão; fator de forma.

Citar como: P. Vila, M. N. Pereyra, Á. Gutiérrez (2017), “Resistência à compressão de peças de concreto para pavimentação. Resultados que tendem a validar o ensaio em meia peça”, 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.

Informações legais

ALCONPAT Magazine é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No. 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização desta questão, ALCONPAT IT Unit, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada na segunda edição do ano de 2018, desde que a informação seja recebida antes do encerramento do primeiro ano de 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.

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

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.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância e finalidade do estudo

As pedras de concreto para pavimentação, *pavers*, são elementos pré-fabricados que constituem a camada de rolamento dos pavimentos articulados. No Uruguai, o padrão UNIT 787 (1989) "Pavimentação de concreto Portland" fornece os requisitos necessários para o seu controle de qualidade, incluindo: características dos materiais utilizados na sua fabricação, características geométricas e de aparência, resistência a compressão, resistência ao desgaste e absorção.

Atualmente, são produzidos *pavers* de diferentes formas e espessuras, no Uruguai são geralmente retangulares ou do tipo Unistone, com 60mm, 80mm ou 100mm de espessura (nos casos de pavimentos com circulação de veículos especiais ou pesados, como nas áreas de portos e aeroportos esta deve ser maior ou igual a 80mm).

Para a determinação da resistência à compressão, o padrão UNIT 787 estabelece como procedimento de teste o indicado no padrão UNIT 101 (1998). Pelo menos três espécimes devem ser testados e, a menos que a seção transversal seja superior a 260 cm², o teste é realizado em *pavers* inteiros (se exceder, a peça pode ser cortada) (UNIDADE 787, 1978). No Uruguai, a pavimentação fabricada não excede esse valor, portanto, espécimes inteiros são sempre testados.

Para o controle de qualidade, a produção de *pavers* é dividida em lotes, cada um composto de não mais de 5000 *pavers*. Por sua vez, em cada lote, a amostra de teste deve incluir nove *pavers* (três para o teste de resistência à compressão, três para o teste de absorção e três para o teste de desgaste). Em um dia normal de trabalho, a empresa fabricante de *pavers* pode produzir até 19.000 peças por dia (equivalente a uma área de chão de aproximadamente 380m²), portanto, será necessário separar e testar cerca de 36 pedras para realizar o controle de qualidade do mesmo.

O presente artigo faz parte do trabalho de revisão e atualização dos pavimentos uruguaios que o Instituto de Estruturas e Transportes (IET) da Faculdade de Engenharia (UdelaR) realiza. Um dos tópicos de revisão é a quantidade de *pavers* necessários para os testes, que na prática é excessivo para um controle de fabricação. A possibilidade é estudada aqui de que todos os testes (compressão, absorção e desgaste) sejam realizados no mesmo *paver*, o que implicaria a redução da quantidade de peças para um terço. Nesta linha, o objetivo deste trabalho é validar o teste de resistência à compressão realizado em meio *paver*, comparando estes resultados experimentais aos obtidos nos testes de *pavers* inteiros, para um total de 24 lotes de produção.

A principal diferença entre os corpos de prova ensaiados é o seu comprimento, e dado que na bibliografia não existem coeficientes de conversão específicos que permitem padronizar o resultado do teste para um único comprimento de pavimentação, o presente trabalho analisa esse aspecto.

Para a mesma resistência, todos os *pavers* inteiros ensaiados têm uma área de seção transversal aproximadamente duas vezes maior do que a peça serrada, portanto, a carga máxima fornecida pela prensa de ensaio deve ser aproximadamente o dobro do que a necessária para meia peça, conforme proposto (por exemplo, para 45MPa), a carga máxima é da ordem de 1100kN para peça de pavimentação inteiras e 550kN para meia peça). Embora hoje em dia a capacidade máxima das prensas de ensaio não seja uma limitação, dá a possibilidade de usar prensas de menor capacidade, como as que ainda estão disponíveis em alguns trabalhos. Além disso, o teste de meia peça abre a possibilidade de fazer o teste em menos tempo.

Note-se que, nos atuais padrões internacionais de controle de qualidade de peças de concreto para pavimentação (ASTM C936, 2016, BS EN 1338, 2003, IRAM 11656, 2010, ICONTEC 2017, 2004, NTON 12 009, 2010), apenas ASTM C936 (de acordo com os procedimentos de teste indicados em ASTM C140, 2017) e NTON 12 009 consideram a resistência à compressão dentro dos requisitos. Ambas as atualizações recentes introduziram um fator de correção do resultado quando testou peças de diferente relação espessura / largura. No entanto, não menciona quando os elementos da mesma proporção de espessura / largura são testados e o seu comprimento é modificado, como é o caso entre o *paver inteiro* e meio *paver*.

1.2 Influência da restrição das placas de carga associadas à forma do elemento no resultado do teste de resistência à compressão.

A tensão de compressão surge do quociente entre a carga de teste máxima (carga de fratura de compressão) e a superfície transversal do elemento testado. Portanto, para elementos feitos do mesmo concreto, submetidos a um mesmo processo de compactação e cura, as diferenças no resultado do teste devem ser apenas aleatórias, típicas do processo de produção. No entanto, isso não acontece, alguns fatores relacionados ao próprio teste e a condição do elemento antes do julgamento podem afetar o resultado (Cánovas, 2007, Bazant, 2000, Neville, 2011, Newman e Choo, 2003, Lamond e Pielert, 2006).

Dentre destes fatores se encontra o efeito da restrição das placas de carga no elemento a ser testado. Estes, geram uma restrição lateral ao movimento na superfície do elemento que, dependendo da sua esbeltez e / ou geometria, pode afetar o resultado do teste. Esta restrição depende do coeficiente de atrito entre a superfície do elemento e a placa de carga (que, por sua vez, depende do acabamento

utilizado no topo do corpo de prova) e a seção do elemento (Indelicato e Paggi, 2008, Van Vliet e Van Mier, 1995, Van Mier et al., 1997; Barbosa et al., 2010).

Para os elementos de baixa esbeltez, o efeito de restrição (Figura 1) pode ser verificado pela diferença entre a deformação lateral que o elemento sofre quando é submetido à restrição das placas de carga (sujeito a um esforço de compressão σ_1 e a um esforço de fricção τ_{12}) (Figura 1a) e quando não é (sujeito apenas a σ_1 , por exemplo, interpondo uma folha de Teflon entre a superfície engrasada do elemento e as placas carga) (Figura 1b). Essa restrição ao movimento em conjunto com uma baixa esbeltez influencia o resultado da resistência à compressão do teste (Barbosa et al., 2010).

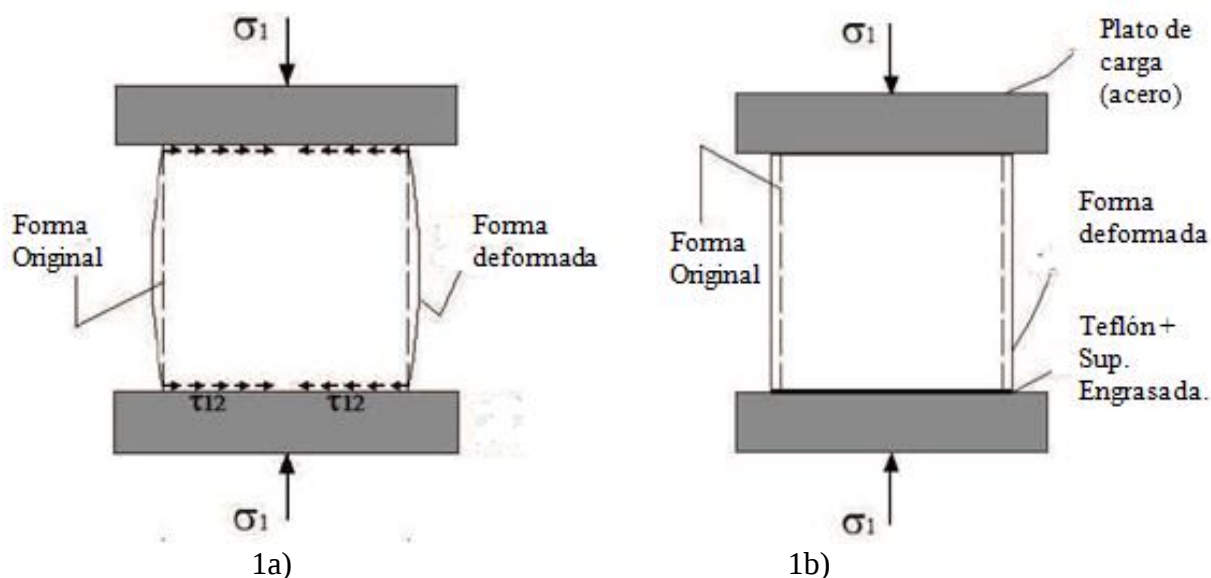


Figura 1. Efeito da restrição das placas de carga em elementos de baixa esbeltez. Figura 1a): suporte direto das placas de carga. Figura 1b): interposição de uma folha de Teflon na superfície engrasada) (extraída de Barbosa et al., 2010).

Para elementos de seção cilíndrica, o coeficiente de esbeltez é definido como o quociente entre a altura e seu diâmetro e para elementos de seção quadrada (ou retangular), é definido como o quociente entre a altura e a largura. Portanto, considerando o efeito da restrição das placas de carga e para elementos de baixa esbeltez, o resultado do teste deve ser ajustado para um valor normalizado de resistência, independente da forma ou tamanho do elemento testado. Algumas referências são citadas onde esses coeficientes são indicados: ASTM C42 (2012); ASTM C140 (2017); BS EN 12504-1 (2009); UNIT-NM 69 (1998); IM (2001).

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1 Materiais

Para o estudo, foram analisadas peças de concreto para pavimentação de diferentes lotes de produção de uma empresa local, extraídos aleatoriamente, perfazendo um total de 24 lotes.

As peças de concreto para pavimentação são elementos fabricados com cascalho de 2-5 mm, pedra britada cinza de 5-14 mm, cimento Portland normal e água. O concreto é vertido nos moldes em uma vibro-prensa, equipamento que vibra e compacta automaticamente até obter as dimensões e densidade desejadas. As proporções, bem como a pressão da vibro-prensa dependem da resistência

que você deseja obter em cada um dos lotes. Eles são curados em fornos a vapor e depois armazenados até serem levados para uso no local, ou até a data do teste, após 28 dias de idade. Os blocos testados apresentaram uma seção de acordo com a Figura 2a) (peça inteira) e Figura 2b) (meia peça). De acordo com a forma de toda a pedra de pavimentação, eles foram identificados como peças de pavimento de tipo Unistone, 10 cm de espessura nominal, bisotado na face superior e encaixes nas faces laterais (Figura 2c).

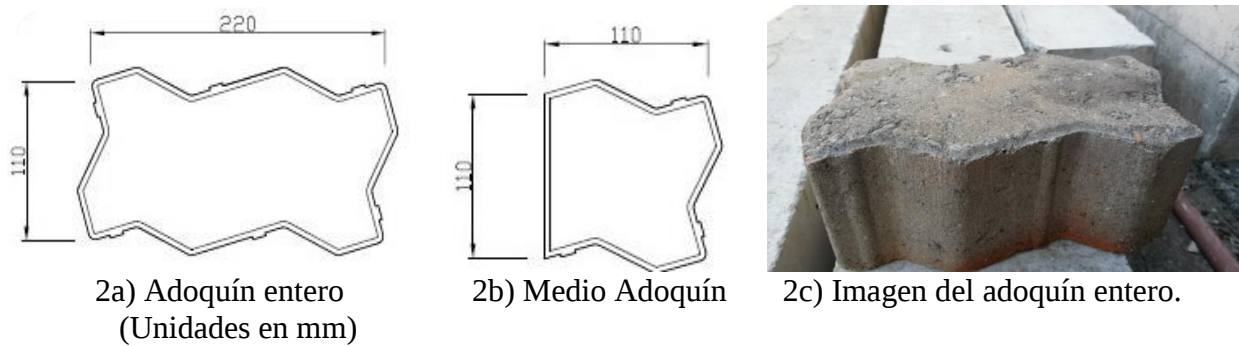


Figura 2. Seção de peça inteira (2a) e meia peça (2b) e imagem das pedras de pavimento testadas (2c).

Para determinar a resistência à compressão, os pavers foram testados de acordo com o procedimento de teste da UNIDADE padrão NM 101 (1998) sob condições de umidade natural. Os espécimes destinados ao teste em meias peças, foram previamente serrados pelo seu eixo menor, usando uma lâmina de serra de diamante.

Entre as placas de carregamento da prensa e a superfície das peças, corpos de prova, em todos os casos foram colocadas placas de madeira de MDF de tipo compensado (madeira de densidade média) para uma melhor distribuição da carga. A prensa de ensaio utilizada foi Marca MATEST Modelo C056P122, com capacidade de carga de 2000kN com controle de velocidade de carga (velocidade de carga média para testes de 0,25 MPa / s).

2.2 Metodologia

Foram realizados ensaios à compressão de cada lote amostrado 4 peças de pavimento inteiras e 4 meias peças. Com o resultado da carga máxima do teste e dividindo pela seção nominal do exemplar, a tensão de compressão individual de cada peça foi calculada (identificada como $find_entero$ e $find_medio$).

A seção nominal (SNadoq) para cada tipo de peça foi determinada como o produto das suas dimensões nominais indicadas na Figura 2a) e 2b).

Uma vez que a profundidade do bisotado foi mínima em relação à altura do elemento testado (aproximadamente 5 mm, contra uma altura nominal de 100 mm), a diminuição na seção superior da pavimentação foi ignorada devido à presença do mesmo, não sendo considerada para o cálculo da seção transversal.

O resultado da resistência por lote para cada tipo de peça foi calculado como a média dos resultados individuais válidos em lotes (identificados como $fexp_entero$ para peça inteira e $fexp_medium$ para meia peça). Para validar os resultados individuais, foi adotado o critério de alcance máximo ($rmax$), que decorre da metodologia proposta pelo Regulamento Argentino CIRSOC 201 (2005) para o controle da conformidade do concreto a partir de amostras cilíndricas. A distância r foi calculada como a diferença entre o valor individual máximo ($find_max$) e o valor individual mínimo ($find_min$) dividido pela média dos resultados pelo lote e pelo tipo de peça ($fexp$) de acordo com

a equação (1). O valor de r foi limitado a 20% do valor médio f_{exp} de acordo com a equação (2) para ambos os tipos de pavimentos.

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

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

Nos lotes em que r foi superior a 20%, o resultado individual foi descartado ainda mais, sendo r calculado novamente com os valores individuais remanescentes, verificando novamente e calculando a nova média por lote (f_{exp_entero} para peças inteiras e f_{exp_medium} para meia peça). As peças testadas foram extraídas aleatoriamente de cada um dos lotes de produção, pertencentes ao mesmo concreto, submetidos ao mesmo processo de cura, armazenamento e teste em condições similares (umidade no momento do teste, em uma única pressão, para velocidade de carregamento igual e cabeçalho igual). Ambos tiveram a mesma altura para o teste (correspondente à espessura da pavimentação) e a mesma largura. No entanto, o comprimento era diferente, considerando esta a principal diferença entre os dois.

Como não há coeficientes específicos para elementos de seção retangular que permitem normalizar o resultado do teste para elementos de um único comprimento, consideraram-se os coeficientes que surgem da bibliografia para elementos de concreto cilíndricos (ASTM C42, 2012; BS EN 12504-1, 2009; UNIT-NM 69, 1998; IM, 2001). Para o qual o diâmetro equivalente d_{eq} foi definido, de acordo com a equação (3), um parâmetro que corresponde ao diâmetro de uma seção circular da mesma área que a seção transversal nominal das pavimentadoras SNadoq.

Este parâmetro d_{eq} permitiu considerar a variação na superfície de suporte das placas de carga ao modificar o comprimento da seção transversal da pavimentação e desta forma considerar sua influência no resultado do teste.

A esbeltez equivalente a elementos cilíndricos $\lambda_{eq,cil}$, de acordo com a equação (4), foi calculada a partir do diâmetro equivalente d_{eq} e a espessura e da peça.

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

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

O coeficiente $\lambda_{eq,cil}$ permitiu a obtenção da resistência similar a normalizada obtida em elementos cilíndricos de esbeltez 2 (multiplicando o resultado do teste pelo valor k que emerge da referência IM da Tabela 1).

Os valores de k que surgiram, a partir da referência IM, foram escolhidos, uma vez que estes permitem considerar coeficientes de ajuste para uma esbeltez $\lambda < 1$ (como é o caso das pedras analisadas). Esses coeficientes são aqueles usados para testemunhos extraídas de pavimentos de concreto onde valores de λ até 0,5 são admitidos. De acordo com Cánovas (2007) e Neville (2011), para os elementos de baixa esbeltez, o resultado do teste é fortemente afetado pela restrição das placas de carga da imprensa, razão pela qual a maioria das regras limitam o teste com uma esbeltez $\lambda < 1$ (como mostrado na Tabela 1).

Tabela 1. Valores do coeficiente de conversão de resistência k extraído da literatura (valor de referência $\lambda = 2$).

Referencia	Esbeltez λ (altura/diâmetro)						
	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

A Tabela 2 resume os dados geométricos para cada tipo de peça ensaiada bem como d_{eq} , $\lambda_{eq, cil}$ e os valores de k (k_1 para peça inteira e k_2 para meia peça) adotados de acordo com a esbeltez equivalente $\lambda_{eq, cil}$ (linearidade aplicada entre os valores de IM da Tabela 1).

Tabela 2. Características dos pavimentos testados.

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: os dados geométricos dos pavimentos são valores nominais, considerando a meia peça serrada pelo seu eixo menor).

Para cada um dos lotes analisados, a partir dos valores experimentais de resistência média de peças inteiras (f_{exp_entero}) e resistência média de meias peças (f_{exp_medio}) e usando o fator k_1 e k_2 da Tabela 2, os valores de resistência foram calculados em peças inteiras e meias peças normalizados para a esbeltez 2 de elementos cilíndricos (identificados como fk_1_entero e fk_2_media), de acordo com a equação (5) e a equação (6):

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

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

Em resumo, o procedimento baseou-se na análise das diferenças entre os resultados de resistência experimental de todas as peças ou meias peças ensaiadas para cada um dos lotes. Se houver diferença significativa entre os resultados, assumiu-se que a principal diferença foi a consequência da alteração do comprimento das peças testadas. Então, ao aplicar um fator de conversão que permitiu que o resultado fosse normalizado para o mesmo tamanho de elemento, analisamos quão significativas foram as diferenças resultantes (o esquema de trabalho é mostrado na Figura 3).

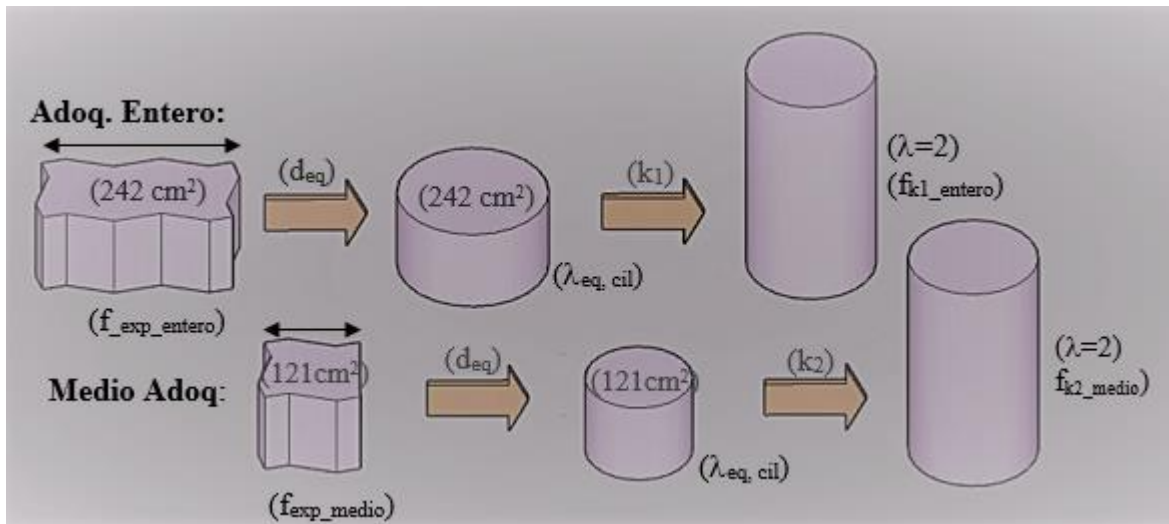


Figura 3. Esquema de análise.

Se as diferenças entre os resultados normalizados para o mesmo tamanho de elemento (para $\lambda = 2$) não são significativas, a hipótese considerada é verdadeira. Esta metodologia de análise decorre do trabalho do ICPI (Interlocking Concrete Pavement Institute) e da NCMA (National Concrete Masonry Association) para a determinação dos coeficientes indicados no ASTM C140 Standard para elementos prismáticos (Walloch et al., 2014). Neste trabalho, analisamos quão significativas as diferenças nos resultados são aplicando os coeficientes de ajuste correspondentes.

Para poder vincular os resultados experimentais, o coeficiente k_{exp_adoq} é definido como o quociente entre os resultados da resistência de paralelepípedos cheio e meio cobblestone, de acordo com a equação (7). Da mesma forma, o coeficiente k_{fk_adoq} é definido como o quociente entre as resistências normalizadas à esbelteza 2, de acordo com a equação (8).

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

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

O T-Test das médias foi utilizado para analisar as diferenças entre a resistência média das peças inteiras (f_{exp_entero}) e a resistência média em meia peças (f_{exp_medio}) para cada um dos lotes. A hipótese nula H_0 considera que ambas as médias pertencem ao mesmo grupo de resistências. Se H_0 for rejeitado, com um nível de certeza de 95% ($p\text{-valor} < 0,05$), ambas as médias são diferentes e, portanto, a resistência em inteira é diferente da meia peça para cada um dos lotes.

Finalmente, os resultados experimentais da resistência à compressão em peça inteira foram traçados de acordo com os resultados experimentais em meias peças (f_{exp_entero} vs f_{exp_medio}). Adotamos um modelo de correlação linear e um modelo polinomial de segunda ordem (ambos sem termo independente) e o menor ajuste de quadrados aos dados experimentais foi analisado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência à compressão: resultados experimentais e resultados normalizados para um único tamanho de elemento.

Figura 4a) mostra uma peça de pavimentação inteira pronta para o seu teste, na Figura 4b) a forma de ruptura típica que apresentou toda a peça de pavimentação e na Figura 4c) a forma típica de quebra em meia peça.

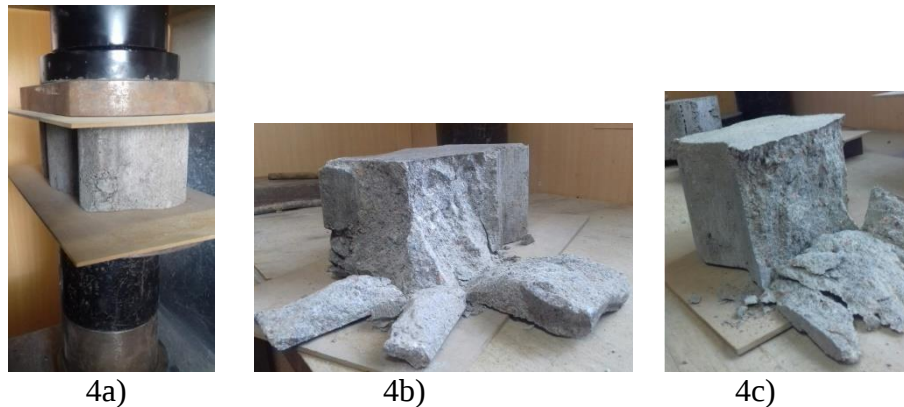


Figura 4. Imagem inteira de paralelepípedos pronta para testes (4a), ruptura típica de calha completa (4b) e intervalo típico de meia cobbles (4c).

Conforme mencionado na Introdução (item 1.2), para elementos de baixa esbelteza, toda a altura do elemento será afetada pela restrição das placas de carga da prensa. Este efeito pode ser verificado durante o teste pela formação da denominada forma de ruptura "cones" ou "frustroconical", na qual o elemento falhará ao adotar essa forma de ruptura (Van Vliet e Van Mier, 1995). No caso específico das peças, em ambos os casos observou-se este tipo de falha, portanto, a altura total da pavimentação foi submetida ao efeito de restrição das placas de carga.

O gráfico dos resultados experimentais de resistência em peças inteiras e meias permitiu visualizar a evolução da resistência dos lotes testados (Figura 5). São indicados os valores médios por lote (f_{exp_entero} e f_{exp_medio}) e os resultados individuais máximos e mínimos em cada lote para ambos os tipos de peças ($f_{ind_entero_max}$ e $f_{ind_entero_min}$ para peças inteiras e $f_{ind_medio_max}$ e $f_{ind_medio_min}$ para meias peças). Os resultados são expressos em MPa.

A resistência em f_{exp_entero} (peças inteiras) teve um valor máximo de 42,6 MPa no lote 1 e um valor mínimo de 27,5 MPa no lote 12. Para meia peça, o valor máximo de f_{exp_media} foi de 35,3 MPa no lote 2 e o valor mínimo 19,2 MPa no lote 12.

Embora tenha sido obtida uma alta variabilidade dos resultados ao mudar o lote de produção (associado a diferenças de produção e controle de qualidade deficiente no fabrico das peças), no gráfico da Figura 5 pode-se observar que em cada lote f_{exp_entero} foi maior do que f_{exp_medio} . Essas diferenças foram analisadas por meio do T-Test da média, considerando como hipótese nula H_0 que f_{exp_entero} foi igual a f_{exp_medio} em cada lote. Em todos os casos, obteve-se um valor de $p < 0,05$, portanto, a hipótese nula é rejeitada e com um grau de certeza de 95%, é estatisticamente confirmado que os resultados em paralelepípedos inteiros e meia peças foram diferentes.

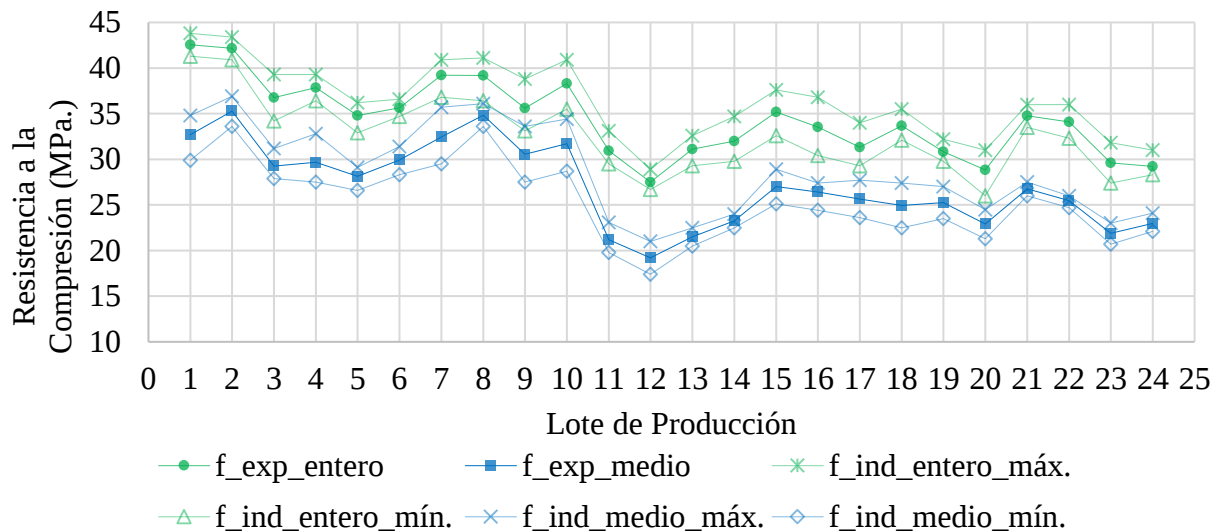


Figura 5. Evolução dos resultados experimentais da resistência à compressão das peças por lote.

Além dos resultados de f_{exp_entero} e f_{exp_medio} foram diferentes, o gráfico f_{exp_entero} vs f_{exp_medio} pode ser observado que há uma relação entre ambos, quando a resistência aumenta em meio cobblestone, a resistência aumenta em todo o paralelepípedo (Figura 6). A linha $y = x$ é plotada, o que permite ter uma referência com os valores que possuem a ordenada igual à abscisa.

Uma vez que se supõe que a principal diferença entre os dois tipos de pavimentos foi o seu comprimento, a influência desta variável no resultado do teste de compressão foi analisada. Aplicando a equação (3), o diâmetro equivalente d_{eq} foi obtido para cada tipo de pavimentação e a calcinha equivalente d_{eq} foi calculada, de acordo com (4). A partir deste parâmetro e dos coeficientes que surgem a partir da bibliografia (coeficientes de IM na Tabela 1), o resultado de resistência padronizado foi obtido para ambos os tipos de cobbles (f_{k1_entero} e f_{k2_medio} de acordo com as equações (5) e (6)).

Ao normalizar o resultado da resistência a elementos de igual tamanho, obtiveram-se resultados semelhantes: os pontos correspondentes a f_{k1_entero} vs f_{k2_medio} são muito próximos da linha $y = x$ como mostrado no gráfico da Figura 6. Portanto, a principal diferença entre os resultados experimentais podem ser associados ao coeficiente considerado.

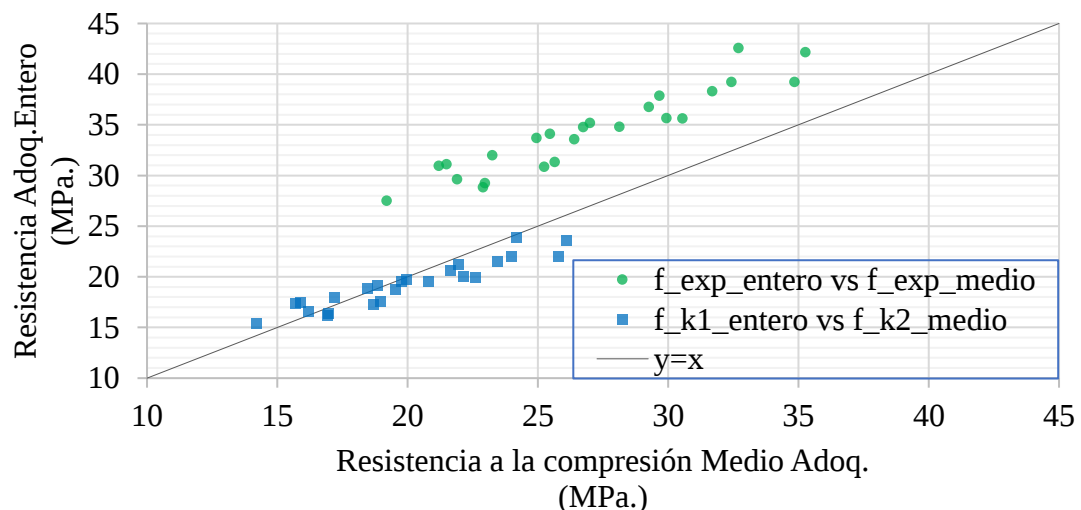


Figura 6. Resistência à compressão das peças. Valores experimentais e resultados normalizados.

Nan Vliet e Van Mier (1995) testaram elementos de seção quadrada de 10cm x 10cm e uma altura entre 2.5cm e 20cm com dois tipos de acabamento dos topos: suporte direto na superfície do elemento (alta fricção como mostrado na Figura 1a)), e outro sistema que interpõe entre eles uma folha de teflon (baixa fricção, neste caso, as placas de carga não restringem o movimento transversal como mostrado na Figura 1b)). Para um concreto com uma tensão aproximada de 54MPa (em um cubo de controle a 15cm da borda), apenas nos casos em que o elemento foi submetido à restrição das placas de carga, o resultado do teste foi significativamente modificado variando a esbeltez do o mesmo. As diferenças obtidas entre as deformações transversais nas extremidades do elemento e a metade da sua altura (no caso do contato direto) confirmam o fato da restrição gerada pelas placas de carga.

Idelicato e Paggi (2010) estudaram as diferenças no resultado do teste entre elementos cilíndricos (altura / diâmetro = 2) e cúbico (altura / lado = 1) para diferentes coeficientes de atrito entre as placas de carga e a superfície do elemento. Eles observaram que as diferenças nos resultados dependem do grau de fricção e, portanto, da restrição gerada pelas placas, somente nos casos de esbeltez igual ou superior a dois, o resultado do teste não é afetado por esse fato.

Portanto, para elementos de baixa esbeltez (como é o caso das peças), todo o elemento estará sujeito à restrição das placas de carga (Figura 1a)) e como Nan Vliet e Van Mier (1995) e Idelicato e Paggi (2010), o resultado da resistência será fortemente afetado pela restrição que se estende por toda a altura do elemento.

A meia peça é um elemento que apresenta seus lados semelhantes um ao outro (aproximadamente 11cm x 11cm), portanto, o coeficiente de ajuste adotado no presente trabalho ($k_2 = 0.74$) está incluído entre os coeficientes que foram relatados em a bibliografia para elementos cúbicos (entre 0,72 e 1,02) (Zabihi e Eren, 2014; Yi, et al., 2006).

Deve ter-se em consideração que os coeficientes de ajuste indicados na bibliografia são valores médios que dependem de vários fatores, tais como: a condição de umidade do elemento, o tipo de cabeçalho, o nível de resistência e o módulo de elasticidade do concreto entre outros (Zabihi e Eren, 2014; ASTM C42, 2012). Dado que o ajuste para os coeficientes do MI permitiu "absorver" as diferenças mais significativas entre ambos os tipos de peças, não foi considerado necessário pesquisar a bibliografia para outros possíveis coeficientes de ajuste.

Como já mencionado na Introdução, para os elementos de concreto prismático, os coeficientes de correção da resistência indicados na bibliografia apenas consideram a influência do quociente entre a altura e sua largura. Tal é o caso do ASTM C140 (2017), Anexo A4, que considera o coeficiente de conversão (F_a) para elementos que têm uma relação de aspecto R_a (espessura / largura) diferente de 0,612 (naquela a espessura pode variar entre 6cm e 12cm, mas mantendo uma seção de teste constante de 9.8cm x 19.8cm). Portanto, as diferenças obtidas entre os pedregulhos do estudo não podem ser associadas ao coeficiente de esbeltez dessa norma.

Outra variável entre os dois tipos de peças ensaiadas foi o efeito da serragem ao meio das peças, mas dado o seu coeficiente de esbeltez considerado permitido "absorver" como resultados diferentes entre os dois tipos de peças, considera-se que esta variável não afetou significativamente ou resulta teste.

3.2 Influência do nível de resistência nos resultados.

Para analisar a influência do nível de resistência das diferenças obtidas entre os dois tipos de pavimentos, o coeficiente k_{exp_adoq} foi definido, como o quociente entre os resultados experimentais para ambos os tipos de pavimentos, de acordo com a equação (7). Ao traçar k_{exp_adoq} vs f_{exp_medio} (Figura 7), pode-se ver que, para baixos valores de resistência, o valor de k_{exp_adoq} foi de 1,46 (lote 12), mas para níveis de resistência maiores, o valor de k_{exp_adoq} diminuiu para 1,12 (lote 8), apresentando um valor médio de 1,28.

Para o coeficiente que decorre dos valores de resistência normalizados (k_{fk_adoq} de acordo com a equação (8)), obteve-se um máximo de 1,1 (lote 11), um mínimo de 0,85 (lote 12) e um valor médio de 0,97 (Figura 7). Todos os valores estavam muito próximos da unidade, confirmados dessa maneira, a semelhança entre os valores normalizados de resistência (entre f_{k1_entero} e f_{k2_medio}).

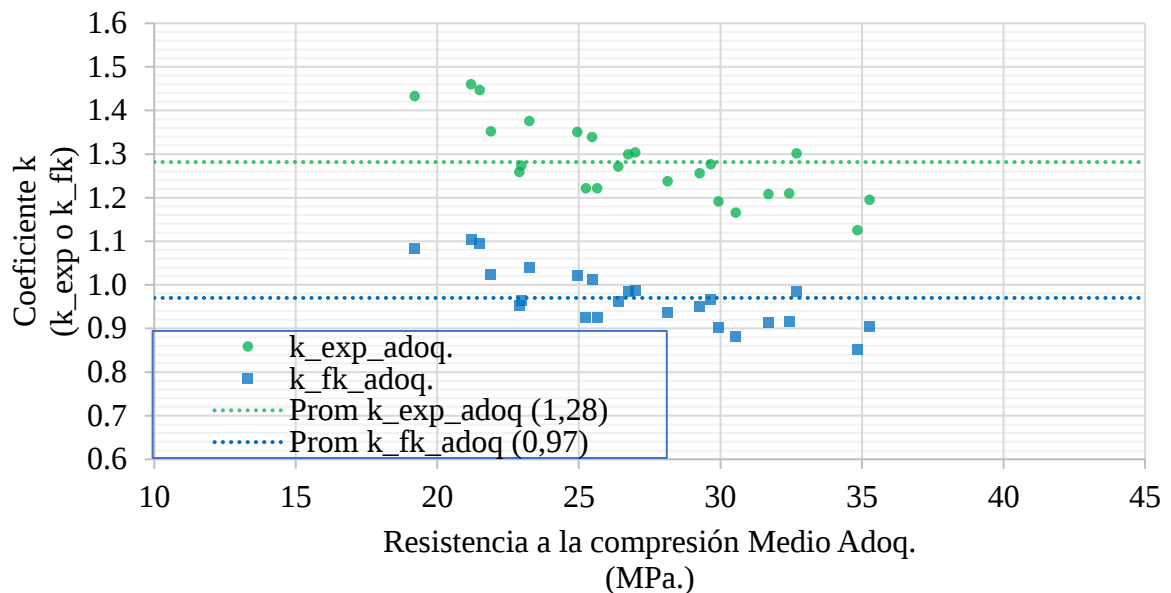


Figura 7. Gráfico dos coeficientes k (k_{exp_adoq} e k_{fk_adoq}) como função do nível de resistência.

Do coeficiente k_{exp_adoq} observou-se que a relação entre os resultados de resistência que resulta das peças inteiras e meia peças depende do nível de resistência. Para os elementos de menor resistência, as diferenças foram maiores do que para níveis mais altos de resistência. O que se segue está de acordo com ASTM C42 (2012), o que indica que os coeficientes utilizados para o concreto de resistência normal (entre 14MPa e 42MPa) não devem ser usados para betão de alta resistência onde os coeficientes mais próximos da unidade devem ser usados.

Yi, et al. (2006) mostraram que o fator de conversão de elementos cúbicos (10cm x 10cm x 10cm) para cilíndricos (15cm x 30cm) foi de 0,82 para um nível de resistência entre 27MPa e 43MPa (considerado concreto de resistência normal) e 0,92 para um nível de resistência superior a 66 MPa (considerado concreto de alta resistência). Uma conclusão semelhante pode ser extraída do trabalho já citado por Nan Vliet e Van Mier (1995), onde os autores indicam que, para concretos com maiores resistências, as diferenças entre os resultados foram menores do que para uma resistência de 54MPa.

Em todos os casos, ao aumentar a resistência, o concreto apresenta uma maior rigidez e, portanto, uma deformação lateral mais baixa. Desta forma, a restrição ao movimento gerado pelas placas de carga tem menor influência no resultado do teste. Algo semelhante aconteceu com os resultados experimentais das pedras de pavimentação que, ao aumentar a resistência, o coeficiente k_{exp_adoq} diminuiu (aproximando-se da unidade).

3.3 Correlação entre os resultados experimentais de peças inteiras e meias peças.

A partir da análise realizada em 3.1, concluiu-se que a principal diferença entre os resultados experimentais de peças inteiras e meias peças foi uma consequência do efeito de restrição gerado pelas placas de carregamento da imprensa quando o comprimento do elemento foi modificado. Portanto, ambos os resultados estão correlacionados.

Adotando dois modelos de comportamento (função linear e polinomial de segunda ordem, ambos sem termo independente), os coeficientes foram calculados por regressão por ajuste por mínimos quadrados aos dados experimentais (Figura 8).

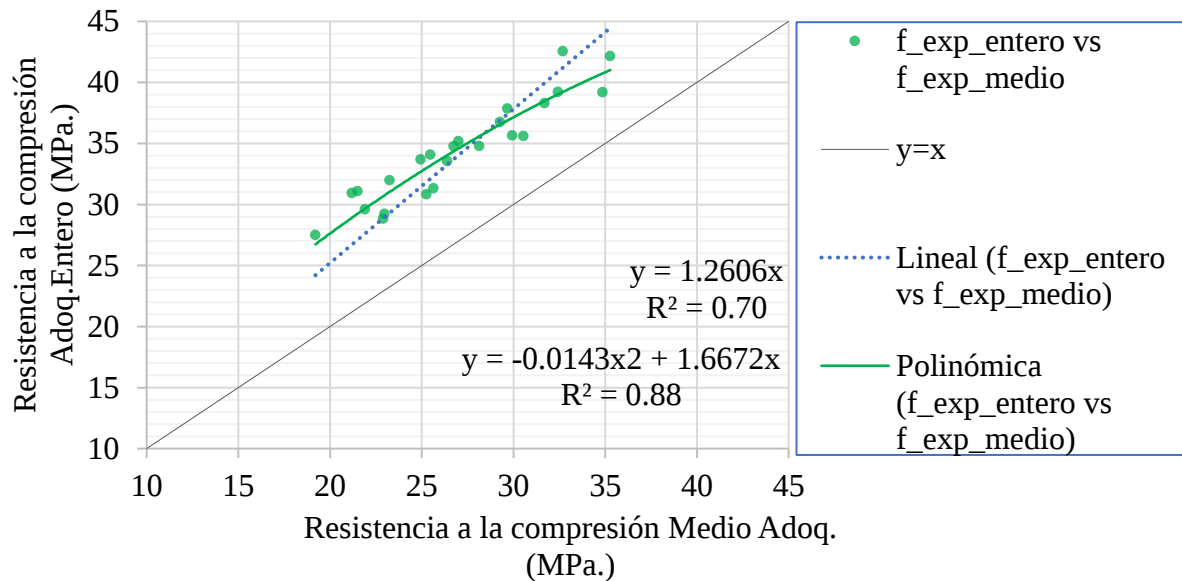


Figura 8. Relação entre a resistência total de peças inteiras versus a meios peças e os modelos de correlação aplicados.

O modelo de função polinomial de segunda ordem sem termo independente apresentou melhor ajuste aos dados experimentais com um r^2 de 0,88, enquanto o modelo linear apresentou um r^2 de 0,70.

Conforme indicado em 3.2, quando a resistência aumentou, a diferença entre o resultado de peças inteiras e meios peças diminuiu, portanto, o coeficiente que os relaciona varia dependendo do nível de resistência (coeficiente k_{exp_adoq}). Portanto, para maiores valores de resistência, os pontos no gráfico f_{exp_entero} vs f_{exp_medio} estão mais próximos da linha $y = x$ (Figura 8). Isso reforça o fato de que o modelo de função polinomial apresentou melhor ajuste.

Aplicando a função polinomial, foi obtido um r^2 igual a 0,88, um valor muito próximo de 0,90 (valor mínimo aproximado de r^2 para considerar um modelo matemático aceitável para correlacionar ambos os resultados). Portanto, para o intervalo de resistência do estudo entre 27,5 MPa e 42,6 MPa em pavimentos inteiros, considera-se que ambos os resultados podem ser relacionados pelo coeficiente k_{exp_adoq} (de acordo com a equação 7), coeficiente que variou entre 1,46 (para valores mais baixos de resistência) e 1,12 (para maiores valores de resistência), com um valor médio de 1,28.

A norma UNIT 787 em vigor indica que o resultado do teste, em pelo menos três unidades completas, deve ser maior ou igual a 35MPa para pavimentos comuns de circulação de pedestres e veículos e 45MPa para pavimentos especiais de veículos. Portanto, o trabalho experimental deve ser estendido, permitindo um maior número de lotes testados (para obter um modelo matemático de ajuste com $r^2 > 0,90$) e considere uma gama de resistências que permite incluir maiores resultados de resistência.

4. CONCLUSÕES

Para peças de concreto para pavimentação, pertencentes ao mesmo lote (o mesmo concreto e o mesmo processo de fabricação e cura), o resultado do teste de resistência à compressão em peça

inteira foi maior do que o realizado na meia, para todos os lotes analisados. No entanto, após a aplicação de um *fator de forma* que permitiu normalizar o resultado do teste para um único tamanho de elemento, não foram observadas diferenças significativas entre os dois resultados, portanto, conclui-se que a principal causa dessas diferenças foi o seu comprimento.

Ao correlacionar os valores experimentais obtidos em peças inteiras e meia peça com uma função polinomial de segunda ordem sem termo independente e ajustando os dados experimentais pelos mínimos quadrados, obteve-se um r^2 próximo de 0,90, sugerindo um bom ajuste levando-se em consideração o número restrito de lotes testados e sua dispersão.

Portanto, apesar das limitações do trabalho, os resultados sugerem que a resistência à compressão pode ser determinada pelo teste da meia peça, validando assim o teste nesse tipo de elementos.

Desta forma, a outra metade do elemento poderia ser usada para outro teste, com um menor número de pavers necessários e a possibilidade de usar prensa de ensaio de menor capacidade, fatores que limitam o controle de produção.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto de Estruturas e Transportes (IET) da Faculdade de Engenharia (UdelaR) o equipamento e a localização física necessários para realizar os testes, bem como a empresa que forneceu as peças para o estudo. Agradecemos aos revisores anônimos da revista ALCONPAT, que com suas contribuições enriqueceram este trabalho. E especialmente, um agradecimento ao professor P.M. da Faculdade de Ciências (UdelaR) pela sua contribuição na metodologia de apresentação do trabalho de divulgação de caráter 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).