

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE  
PROVA CILÍNDRICOS E PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO PARA  
PAVIMENTAÇÃO**

**MICHAEL DE LIMA PEDROSA**

**BARREIRAS-BA  
OUTUBRO-2017**

**MICHAEL DE LIMA PEDROSA**


**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE  
PROVA CILÍNDRICOS E PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO PARA  
PAVIMENTAÇÃO**

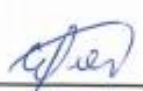
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Civil.


Aprovada em 03 de outubro de 2017 .

**Banca Examinadora**

Orientador:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D.Sc. Juarez Hoppe Filho  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.Sc. Elier Pavón de La Fé  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

  
\_\_\_\_\_  
Eng. Esp. Valter Cunha Bastos Filho  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Universitária do Centro das Ciências Exatas e das  
Tecnologias da Universidade Federal do Oeste da Bahia**

FICHA CATALOGRÁFICA

---

P372 Pedrosa, Michael de Lima.

Análise comparativa da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e peças pré-moldadas de concreto para pavimentação. / Michael de Lima Pedrosa. – 2017.

63 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso: (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Barreiras, BA, 2017.

1. Concreto. 2. Concreto pré-moldado – Resistência de Materiais. I. Hoppe Filho, Juarez. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD: 625.8

---

**MICHAEL DE LIMA PEDROSA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE  
PROVA CILÍNDRICOS E PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO PARA  
PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em 03 de outubro de 2017.

**Banca Examinadora**

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. D.Sc. Juarez Hoppe Filho  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

\_\_\_\_\_  
Prof. M.Sc. Elier Pavón de La Fé  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

\_\_\_\_\_  
Eng. Esp. Valter Cunha Bastos Filho  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

*Ao meu Deus, por toda sabedoria compartilhada e ao meu pai,  
Antonio Pedrosa, por nunca deixar de acreditar em mim.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Juarez Hoppe Filho pela confiança, incentivo e ajuda em todos os momentos.

Aos meus pais, Antonio Pedrosa de Souza e Maria Fátima de Lima, pelo amor, apoio e educação que me trouxeram até aqui.

Aos meus queridos amigos, Saul Pedrosa, Danilo Souza, Pedro Henrique Santana, Rodolfo Novais, Lorena Santana, Rafael Malheiro, Icaro Lobo, Otávio Mota, Thaysa Cristina Oliveira pela ajuda e incentivo no desenvolvimento deste trabalho, mas principalmente pela amizade, conselhos e risadas compartilhadas.

À Peroli Tecnologia, por ter me disponibilizado suas instalações e equipamentos para que boa parte do trabalho fosse desenvolvida.

À Just Mix, por ter me doado o cimento utilizado no trabalho.

À Afonso Alves Teixeira e Patricia Vaz Teixeira por ceder o espaço e betoneira para a realização do concreto.

Aos meus amigos Jose Guetes Neto e Lucas Ribeiro, por auxiliarem na realização e moldagem dos corpos de prova.

À Danillo Figueiredo, por me ajudar diretamente em vários momentos para realização desse trabalho.

À todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram com ações e palavras de incentivo.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

## RESUMO

No trabalho de Xavier (2017), foi identificado que a resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação tiveram resultado inferior à dos corpos de prova cilíndricos para as mesmas relações água/cimento. Assim, despertou interesse em obter mais informações sobre esse comportamento, visando os efeitos das relações, altura/diâmetro e os diferentes formatos dos corpos de prova. Nesse trabalho, foi feita uma análise comparativa, da resistência à compressão entre as peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação e corpos de prova cilíndricos. Foram produzidos concretos, utilizando as relações água/cimento (a/c) iguais a 0,40, 0,50 e 0,60. Para realização dos ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos com relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) = 2,0 que, posteriormente foram cortadas para atingirem relação  $h/d$  = 1,0 e peças pré-moldadas de concreto. Em relação à resistência à compressão dos concretos foi observada uma perda de resistência nas peças pré-moldadas, quando comparadas aos corpos de prova cilíndricos, iguais foram identificados no trabalho de Xavier (2017). No entanto, os corpos de prova cilíndricos e as peças para pavimentação apresentaram valores de resistência à compressão superiores a 35,0 MPa, para algumas relações (a/c). Dessa forma, atingindo alguns dos requisitos estabelecidos pela NBR 9.781 – 2013 para condição de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

**Palavras-chave:** Concreto, resistência à compressão, peças pré-moldadas para pavimentação, corpos de prova cilíndricos.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	14
1.2 PRINCIPAIS TRABALHOS RELACIONADOS AO TEMA .....	16
1.3 OBJETIVO.....	17
1.4 JUSTIFICATIVA .....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA NA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS .....	18
2.2 PEÇAS PRÉ-MOLDADAS PARA A PAVIMENTAÇÃO .....	32
2.2.1 FORMATOS DAS PEÇAS PRÉ-MOLDADAS PARA PAVIMENTAÇÃO (PAVERS).....	33
2.2.2 DIRETRIZES MÍNIMAS PARA AS PEÇAS PRÉ-MOLDADAS PARA PAVIMENTAÇÃO PRECONIZADAS PELA NORMA NBR 9781 (ABNT, 2013).....	34
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 MATERIAIS.....	36
3.1.1 CIMENTO PORTLAND .....	36
3.1.2 AGREGADO MIÚDO .....	36
3.1.3 AGREGADO GRAÚDO .....	37
3.2 DOSAGEM DO CONCRETO.....	38
3.3 MISTURA DO CONCRETO .....	39
3.4 CONSISTÊNCIA.....	39
3.5 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	39
3.6 CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE RELAÇÃO ALTURA/DIÂMETRO IGUAL A 1,0....	40
3.7 PREPARO DA SUPERFÍCIE IRREGULAR DAS PEÇAS PRÉ-MOLDADAS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	41
3.8 ENSAIOS REALIZADOS .....	44
3.8.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS .....	46
4.1.1 CONSISTÊNCIA.....	46

4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	47
4.2.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	47
4.2.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DESTINADAS À PAVIMENTAÇÃO .....	51
4.3	COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS COM RELAÇÃO AS PEÇAS PRÉ-MOLDADAS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	55
5.	CONCLUSÃO .....	57
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
7.	REFERÊNCIAS.....	59
	APÊNDICE .....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensões do corpo de prova cilíndrico e dimensões da espessura da peça de concreto e do disco de aço, e as dimensões do corpo de prova cilíndrico.....	15
Figura 2 – Resistência média à compressão em função do diâmetro do corpo de prova cilíndrico de relação altura/diâmetro igual 2,0.....	21
Figura 3 – Efeito do tamanho dos cilindros sobre a resistência à compressão do concreto (Yl <i>et al.</i> , 2006).....	23
Figura 4 – Efeito do tamanho dos cubos sobre a resistência à compressão do concreto..	24
Figura 5 – Resistência à compressão relativa do concreto decorrente da redução da relação altura/diâmetro de corpo de prova cilíndrico. ....	25
Figura 6 – Resistência à compressão relativa do concreto decorrente da redução da relação altura/diâmetro de corpo de prova cilíndrico. ....	26
Figura 7 – Relação entre a resistência à compressão de corpos de prova de dimensões $\emptyset 10 \times 20$ cm ( $h/d = 2,00$ ) e $\emptyset 10 \times 10$ cm ( $h/d = 1,0$ ). ....	27
Figura 8 – Incremento na resistência à compressão de cilindros de relação altura/diâmetro = 1,0 ( $\emptyset 10 \times 10$ cm) em relação ao cilindro de relação altura/diâmetro = 2,0 ( $\emptyset 10 \times 20$ cm) para faixa de resistência à compressão entre 25 e 105 MPa. ....	28
Figura 9 – Resistência à compressão dos cilindros em função da resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação.....	30
Figura 10 – Evolução das resistências à compressão de concreto misturado na relação água/cimento = 0,40 para corpos de prova cilíndricos ( $\emptyset 10 \times 20$ cm) e peças pré-moldadas para pavimentação (espessura = 8,0 cm).....	31
Figura 11 – Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação. ...	34
Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia). ....	37
Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo (brita). ....	37
Figura 14 – Equipamento utilizado para o corte dos corpos de prova cilíndricos. ....	40
Figura 15 – Corpos de prova com relação h/d igual a 1,0 e 2,0.....	40
Figura 16 – Politriz utilizado para a retificação das peças pré-moldadas de concreto para pavimentação. ....	42
Figura 17 – Peças pré-moldadas para pavimentação capeadas com argamassa. ....	43

Figura 18 – Peças pré-moldadas para pavimentação submetidas à diferentes preparos de superfície. ....	44
Figura 19 – Corpos de prova cilíndricos, de dimensões $\varnothing 10 \times 20$ cm e $\varnothing 10 \times 10$ cm, retificados para a realização do ensaio de resistência à compressão. ....	45
Figura 20 – Ensaio de resistência à compressão de peça pré-moldada para pavimentação, com detalhe da utilização de placa auxiliar para a aplicação de carga.....	45
Figura 21 – Ensaio de abatimento do tronco de cone de um dos concretos estudados....	46
Figura 22 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) = 2,0. ....	47
Figura 23 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) = 1,0. ....	48
Figura 24 – Resistência à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro = 2,0 e altura/diâmetro = 1,0.....	49
Figura 25 – Incremento percentual na resistência à compressão de cilindros com dimensões $\varnothing 10 \times 10$ cm em comparação aos cilindros normalizados ( $\varnothing 10 \times 20$ cm). ....	50
Figura 26 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação com superfície desempenada. ....	51
Figura 27 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação com superfície capeada.....	52
Figura 28 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação com superfície retificada.....	53
Figura 29 – Resistência à compressão, aos 28 dias, das peças pré-moldadas de concreto desempenadas, capeadas e retificadas.....	54
Figura 30 – Resistência à compressão dos cilindros com relação $h/d=2,0$ em função da resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporções de mistura e consumo de materiais por unidade de volume de concreto (m <sup>3</sup> ).....	38
--	----

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Importância do tema

As peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação se difundiram no Brasil na década de 70, auxiliando na infraestrutura do transporte rodoviário e no desenvolvimento da economia.

A norma Brasileira NBR 9780 – Peças de Concreto para Pavimentação Determinação da Resistência à compressão (ABNT, 1987) foi a primeira relacionada ao controle tecnológico das peças de concreto destinadas à pavimentação. Esta norma prescreve a metodologia para a determinação da resistência à compressão de peças pré-moldadas de concreto de vias urbanas. Nela é informada que, no momento do ensaio, as peças devem estar saturadas de água e as superfícies de carregamento capeadas com argamassa de enxofre ou similar, com espessura inferior a 3,0 mm.

O comitê Brasileiro de cimento, concreto e agregados (ABNT/CB-18) cancelou, em 07 de janeiro de 2013, a norma NBR 9780 (ABNT, 1987), a qual foi substituída pela norma NBR 9781 – Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação e Métodos de Ensaio (ABNT, 2013). A atualização ocorreu após 26 anos de utilização da primeira norma, trazendo uma série de modificações.

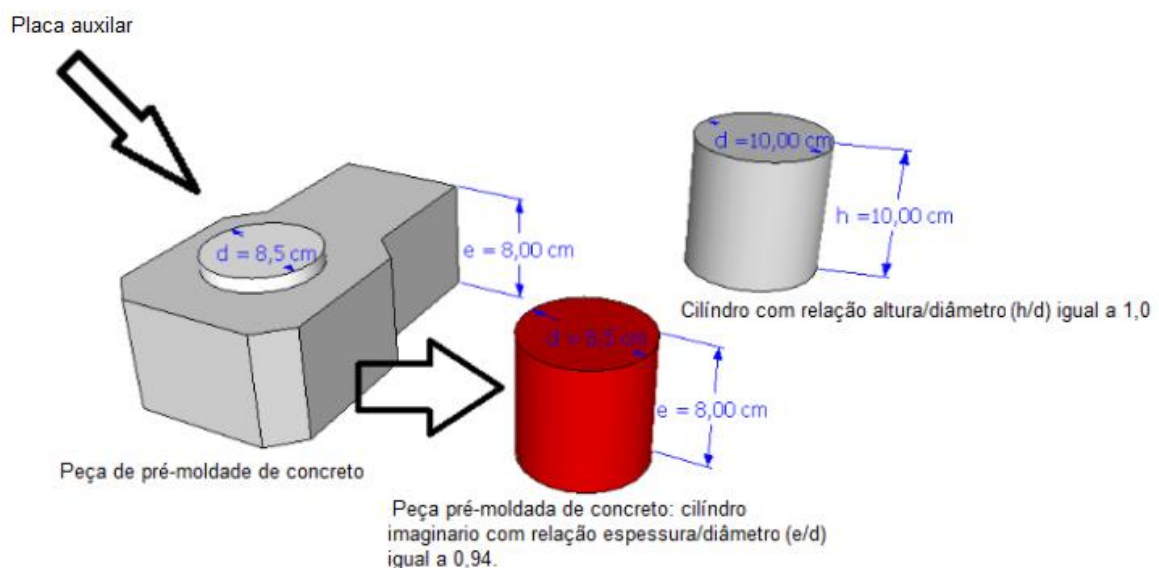
A norma NBR 9781 (ABNT, 2013) indica que as peças pré-moldadas devem estar, no momento do ensaio de resistência à compressão, saturadas em água a  $23 \pm 5$  °C por, no mínimo, 24 horas antes do ensaio, e as superfícies de carregamento devem ser, preferencialmente, retificadas. Verifica-se que houve mudança no quesito relacionado ao preparo das superfícies de carregamento dos corpos de prova, apesar da permissão de realização de outros tipos de capeamento. A norma em vigência também evidencia que o resultado do ensaio de resistência à compressão é influenciado pela espessura dos corpos de prova, de tal forma que são propostos fatores de correção quando a espessura das peças difere de 80,0 mm, dimensão utilizada como referência.

Por outro lado, o meio técnico está familiarizado com a determinação da resistência à compressão do concreto por meio de corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro igual 2,0 sendo, amplamente utilizado, o de dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm. Diante da crescente demanda de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação, surge a necessidade de acompanhamento da conformidade das mesmas para que a

qualidade, ou melhor dizendo, o desempenho seja adequado às condições de tráfego a que estarão sujeitas durante a sua vida útil. Diante deste cenário é possível questionar-se se a resistência à compressão determinada por meio de corpos de prova cilíndricos pode ser considerada idêntica à resistência à compressão das peças pré-moldadas, de geometria completamente diferente, para fins de cumprimento aos requisitos preconizados na norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

De fato, Neville e Brooks (2013) afirmam que a redução da relação altura/diâmetro de corpos de prova cilíndricos resulta em maior resistência à compressão do concreto. Este comportamento também ocorre nas peças pré-moldadas de concreto para pavimentação, tanto que a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) prevê fatores de correção da resistência à compressão em função da espessura da peça. O comportamento previsto na norma é similar ao observado nos corpos de prova cilíndricos, ou seja, a redução da espessura da peça implica em maior resistência à compressão. Na Figura 1 são apresentadas as dimensões de corpo de prova cilíndrico de relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) igual a 1,0, a espessura da peça de concreto para pavimentação, o diâmetro da placa auxiliar de aço utilizada no ensaio de resistência à compressão e as dimensões do cilindro imaginário que recebe o carregamento durante o ensaio de compressão.

Figura 1 - Dimensões de corpo de prova cilíndrico de relação altura/diâmetro igual a 1,0, espessura da peça de concreto para pavimentação, diâmetro da placa auxiliar de aço utilizada no ensaio de resistência à compressão e dimensões do cilindro imaginário que recebe o carregamento durante o ensaio.



No caso das peças pré-moldadas de concreto, a área de aplicação de carga está atrelada ao diâmetro das placas auxiliares utilizadas, as quais devem ter  $85 \pm 5$  mm de diâmetro. Assim sendo, pode-se obter a relação espessura/diâmetro da placa auxiliar ( $e/d$ ), o que representa um cilindro. Por analogia, a relação espessura/diâmetro da placa ( $e/d$ ) utilizada nas peças pré-moldadas pode ser associada à relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) dos corpos de prova cilíndricos. Logo, nas peças pré-moldadas a relação espessura/diâmetro ( $e/d$ ), para a espessura padrão de 80,0 mm, é de 0,94, o que é similar à relação obtida no cilindro de dimensões  $\emptyset 10 \times 10$  cm ( $h/d = 1,00$ ). A proximidade da relação altura/diâmetro do corpo de prova cilíndrico de dimensões  $\emptyset 10 \times 10$  cm com a relação espessura/diâmetro da placa auxiliar de peças com 80,0 mm de espessura deveria resultar, *a priori*, em valores de resistência à compressão similares, apesar de que nas peças pré-moldadas há confinamento do cilindro que sofre carregamento por meio do próprio concreto no entorno da região ensaiada, o que pode exercer influência no resultado.

Diante desta contextualização e da dificuldade que existe no controle tecnológico das peças pré-moldadas de concreto relacionadas à resistência à compressão, vislumbra-se a possibilidade de estabelecer relações comportamentais da resistência à compressão entre corpos de prova cilíndricos e de peças pré-moldadas de concreto com espessura de 80,0 mm. A obtenção destas relações permitiria o controle tecnológico das peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação por meio de ensaio realizado em corpos de prova cilíndricos, o qual é amplamente difundido nas diferentes regiões do Brasil.

## **1.2 Principais trabalhos relacionados ao tema**

O resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto é influenciado por diversos fatores, dentre os quais podem ser citados a geometria dos corpos de prova e as áreas de contato com os pratos da prensa. Os principais trabalhos relacionados à influência destas variáveis na resistência à compressão são apresentados, de forma sucinta, abaixo:

- Yi et al. (2006), avaliando o efeito do tamanho dos corpos de prova sobre a resistência à compressão do concreto, evidenciam que a redução do diâmetro do corpo de prova implica em aumento da resistência à compressão.
- Coura (2006), estudando a influência da dimensão do agregado e do corpo de prova na resistência à compressão axial do concreto, concluiu que quanto maior a dimensão do agregado, menor será a resistência de corpos de prova cilíndricos ( $\emptyset 15 \times 30$  cm) e quanto menores as dimensões dos corpos de prova maior será a sua resistência à compressão.
- Coura (2008), analisando o efeito tamanho em estruturas de concreto, quanto maior a relação altura/diâmetro do corpo de prova cilíndrico menor será a resistência.
- Xavier (2017), identificando que resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação foi inferior à dos corpos de prova cilíndricos para as mesmas relações água/cimento.

### **1.3 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à compressão de concreto por meio de corpos de prova cilíndricos com diferentes relações altura/diâmetro e peças pré-moldadas destinadas à pavimentação com diferentes tipos de preparo de superfícies.

### **1.4 Justificativa**

O desenvolvimento deste trabalho se justifica, em um primeiro momento, pela dificuldade na retificação das superfícies de carregamento de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação a serem submetidas ao ensaio de resistência à compressão na região Oeste da Bahia. Se justifica, também, a partir dos resultados do trabalho de Xavier (2017), a qual sugeriu a avaliação da influência do preparo das superfícies de carregamento de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação, haja vista a autora ter obtido redução na resistência à compressão de peças simplesmente desempenadas durante a concretagem em comparação aos corpos de prova cilíndricos.

De fato, na região do município de Barreiras, Bahia, em virtude da incipiente demanda pelas empresas produtoras de peças pré-moldadas de concreto destinadas à

pavimentação por controle tecnológico dos seus produtos, há dificuldade para a realização de retificação da superfície irregular e, desta forma, em alguns casos, o controle tecnológico do concreto destinado à esta aplicação vem sendo realizado por meio de corpos de prova cilíndricos tradicionalmente utilizados. A fim de avaliar a viabilidade desta prática, este trabalho irá realizar estudo comparativo com o intuito de estabelecer relação comportamental da resistência à compressão de peças pré-moldadas para pavimentação e de corpos de prova cilíndricos. A elucidação desta demanda regional justifica a realização deste trabalho e irá fornecer subsídios técnicos para os profissionais envolvidos na comercialização deste tipo de elemento pré-moldado.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Este capítulo abordará o levantamento bibliográfico referente às variáveis que influenciam na resistência à compressão do concreto, haja vista o presente trabalho ter por objetivo analisar a influência da morfologia de corpos de prova cilíndricos e de peças pré-moldadas para pavimentação nas respectivas capacidades de carregamento.

### **2.1 Influência das dimensões do corpo de prova na resistência dos materiais**

Segundo Yi et al. (2006), todo material possui propriedades inerentes. Essas propriedades só são consideradas específicas e únicas quando não dependem das dimensões e do formato dos corpos de prova. No concreto algumas propriedades, como a resistência à compressão, variam com a mudança do tamanho e o formato dos corpos de prova. Bazant (2000) explica que existem estudos relacionados à influência do tamanho em vários seguimentos desde o século XVI. Leonardo da Vinci (1945) constatou que entre cordas de mesma espessura, a mais comprida possui menor resistência e sugeriu que, quanto menor for uma corda, mais forte ela será. Mariotte (1686), com base na realização de inúmeras experiências, complementou a teoria estatística relacionada ao tamanho. Ele observou que uma corda longa e uma curta sempre suportam o mesmo carregamento, a não ser que exista um ponto em uma das cordas com defeito, o que irá propiciar a ruptura precoce quando for gradativamente tensionada. Esse comportamento foi denominado pelo autor como princípio da desigualdade de matéria, cuja resistência absoluta é menor em um ponto defeituoso em relação aos outros (BAZANT, 2000).

A teoria de Weibull (1951), com fundamentação estatística, diz que quanto maior for a estrutura, maior é a probabilidade de se encontrar no seu volume um material com menor resistência, o que pode desencadear a falha de toda a estrutura (BAZANT, 2000). Essa linha de pensamento foi, por muito tempo, considerada a melhor explicação para o efeito do tamanho do corpo de prova.

Atualmente é aceito que a influência do tamanho do corpo de prova tem caráter determinístico, sendo causada, sobretudo, por redistribuição de tensões e liberação de energia, associados à uma propagação estável de grandes fraturas, ou à formação de grandes zonas com fissuras distribuídas, que são típicas de materiais frágeis, tais como o concreto (COURA, 2006).

Segundo Coura et al. (2008), há influência das dimensões dos corpos de prova nas propriedades mecânicas dos materiais. Essa influência é denominada efeito de escala, o qual é conceituado como sendo a influência das dimensões da estrutura sobre as propriedades dos materiais, sendo insignificante em grandes estruturas, mas com grande influência nas pequenas como, por exemplo, nos corpos de prova utilizados na determinação das propriedades mecânicas de um material com estrutura granular, como o concreto, quanto maiores as dimensões menor a resistência à compressão.

Além do efeito de escala, há interferências na realização do ensaio de resistência à compressão que também interfere no resultado obtido. Na condição ideal, o corpo de prova deveria estar submetido à compressão uniaxial (pura), porém, na prática, é imposto ao ensaio um sistema complexo de tensões, principalmente devido às forças laterais desenvolvidas entre as bases do corpo de prova e os pratos de aço da máquina de ensaio. Essas forças são induzidas pela restrição à tentativa de deformação lateral do concreto (efeito Poisson) imposta pelos pratos de aço, que é mais rígido e tem deformação lateral muito menor. O grau de restrição dos pratos sobre a seção de concreto depende do atrito desenvolvido nas interfaces concreto/pratos e da distância das bases do corpo de prova. Conseqüentemente, além da compressão uniaxial aplicada, existe a tensão lateral de cisalhamento, que tem o efeito de aumentar a resistência à compressão aparente do concreto (NEVILLE & BROOKS, 2013).

Portanto, a resistência à compressão é influenciada pelo efeito de escala e pela interferência dos pratos de aço do equipamento de ensaio sobre as faces (base e topo) do corpo de prova. Essa interferência é maior quanto menor a altura do corpo de prova. Assim

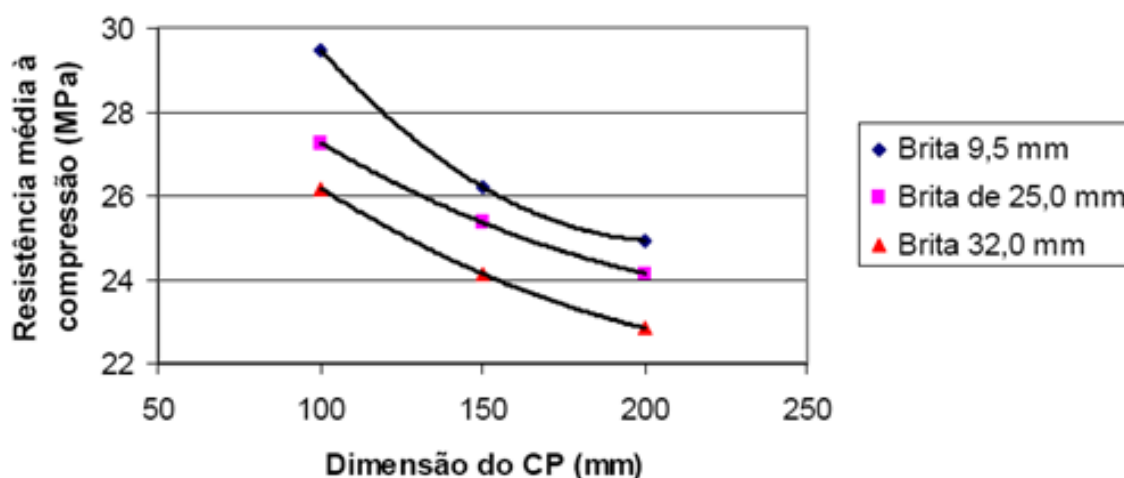
sendo, a morfologia e as dimensões dos corpos de prova utilizados para a determinação da resistência à compressão do concreto devem ser padronizadas (normalizadas). Desta forma, cada país adota o formato e as dimensões dos moldes (fôrmas) para os corpos de prova analisando o que é mais viável, ágil e cômodo. Tais especificações são regidas de país para país, por meio de normas técnicas específicas.

Os corpos de prova com formato cúbico são usados na Europa, enquanto os cilindros com relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) igual a 2,0 são utilizados no Brasil, Estados Unidos e em outras nações. Há países que utilizam tanto cubos como cilindros. Os prismas, menos utilizados nos ensaios, possuem seção quadrada, tendo aproximadamente uma relação entre a altura e a maior dimensão da seção transversal igual à do cilindro (HAMASSAKI & SANTOS, 2013).

A norma brasileira NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto (ABNT, 2003) estabelece que nos cilindros, a altura deve ser o dobro do diâmetro, com diâmetros de 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 45 cm. Nos prismáticos, devem possuir seção transversal quadrada, sendo o comprimento mínimo igual a três vezes a dimensão da seção transversal do corpo de prova acrescido de 50 mm. O uso de corpos de prova cilíndricos com menores dimensões apresenta vantagens, pois há maior facilidade de manuseio e transporte, menor riscos de danos, menor custo com concreto e material para limpeza, menor espaço para armazenamento e, por fim, menor demanda de tempo para a moldagem.

Na bibliografia pertinente existem publicações que comparam os resultados de ensaios de resistência à compressão realizados em corpos de prova com variadas dimensões. O trabalho de Coura *et al.* (2008), ao analisar a influência das dimensões de corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro igual a 2,0 sobre a resistência à compressão de concretos na faixa de 20 a 30 MPa, concluiu que, quanto maior o diâmetro do cilindro, menor a resistência à compressão do concreto, conforme apresentado na Figura 2. No mesmo estudo, os autores também avaliaram a influência da dimensão máxima do agregado graúdo na resistência à compressão, concluindo que a maior granulometria do agregado graúdo resulta em diminuição da resistência à compressão.

Figura 2 – Resistência média à compressão em função do diâmetro do corpo de prova cilíndrico de relação altura/diâmetro igual 2,0.



Fonte: Coura *et al.* (2008)

A partir dos conceitos apresentados por Bazant (2000) fica evidente que para um corpo de prova de maior diâmetro e, conseqüentemente, maior volume de concreto, há maior probabilidade estatística de ocorrência de fissuras e de defeitos pontuais, o que resulta em redução da resistência à compressão.

Yi *et al.* (2006) realizam estudo para avaliar os efeitos do tamanho, forma e direção de lançamento do concreto nas fôrmas sobre a resistência à compressão. As proporções de mistura (traços) utilizados tinham por objetivo atingir, aos 28 dias, as resistências à compressão de 20, 40, 60 e 80 MPa. Os corpos de prova cilíndricos tinham as seguintes dimensões:  $\varnothing 5 \times 10$  cm;  $\varnothing 10 \times 20$  cm;  $\varnothing 15 \times 30$  cm e  $\varnothing 20 \times 40$  cm. Os cúbicos foram:  $5 \times 5 \times 5$  cm;  $10 \times 10 \times 10$  cm;  $15 \times 15 \times 15$  cm e  $20 \times 20 \times 20$  cm. Por fim, os prismáticos foram:  $5 \times 5 \times 10$  cm;  $10 \times 10 \times 20$  cm;  $15 \times 15 \times 30$  cm e  $20 \times 20 \times 40$  cm. Cabe destacar que, ao variar o volume de concreto, ou seja, as dimensões do corpo de prova, o adensamento também precisa ser alterado. A ocorrência de adensamento inadequado impacta na resistência à compressão do concreto, portanto, há que se detalhar como foi realizada a compactação do material. Os autores (YI *et al.*, 2006) não indicam em seu trabalho se houve alteração do processo de adensamento do concreto quando da variação das dimensões dos corpos de prova.

Os resultados de resistência à compressão foram comparados com os modelos matemáticos propostos por Kim e Eo (1990) na Equação 1 e Benjamin e Cornell (1970) na Equação 2.

$$\sigma_N(h,d) = \frac{0.4f'_c}{\sqrt{1 + \frac{(h-d)}{5}}} + 0.8f'_c \quad (1)$$

em que:

- $\sigma_N(h/d)$  = Resistência à compressão de corpo de prova não normalizado, MPa;
- $f'_c$  = Resistência à compressão do corpo de prova normalizado, MPa;
- $h$  = Altura do corpo de prova não normalizado, cm; e
- $d$  = Diâmetro do corpo de prova não normalizado, cm.

$$f_{cy}(d) = \frac{0.49f'_c}{\sqrt{1 + \frac{d}{2.6}}} + 0.81f'_c \quad (2)$$

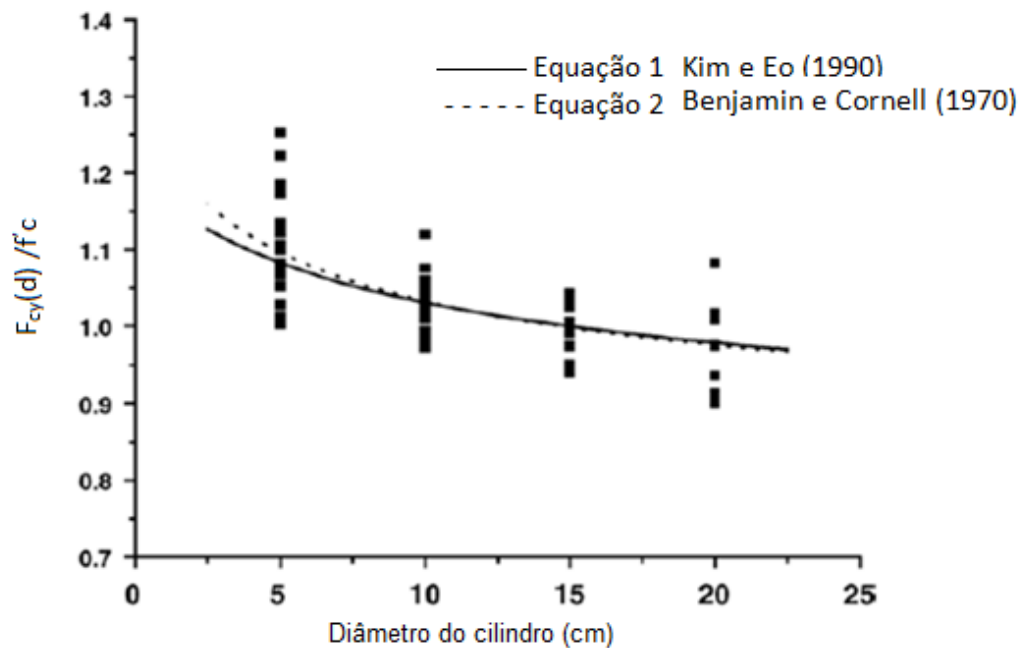
em que:

- $f_{cy}(d)$  = Resistência à compressão de corpo de prova não normalizado, MPa;
- $f'_c$  = Resistência à compressão do corpo de prova normalizado, MPa; e
- $d$  = Diâmetro do corpo de prova não normalizado, cm.

Na Equação 1, verifica-se que é possível estimar a resistência à compressão de corpos de prova de variados diâmetros e alturas, ou seja, com diferentes relações altura/diâmetro ( $h/d$ ). Cabe destacar que este modelo matemático considera o cilindro de referência com dimensões  $\emptyset 15 \times 30$  cm. Já a Equação 2 estima a resistência à compressão em função do diâmetro do corpo de prova, para esse caso foi considerado a relação altura/diâmetro igual a 2,0. Neste modelo, o cilindro de referência também é considerado de dimensões  $\emptyset 15 \times 30$  cm. As equações não representam os resultados experimentais de Yi *et al.* (2006), sendo modelos matemáticos que descrevem o comportamento da resistência à compressão em função das dimensões do cilindro.

A Figura 3 apresenta os resultados experimentais e as curvas que representam a variação da resistência à compressão em função da variação do diâmetro dos corpos de prova de relação altura/diâmetro igual a 2,0. Estes resultados referem-se ao corpo de prova de referência de dimensões  $\emptyset 15 \times 30$  cm. A curva cheia foi obtida a partir da aplicação da Equação 1, enquanto a linha pontilhada foi obtida pela Equação 2.

Figura 3 – Efeito do tamanho dos cilindros sobre a resistência à compressão do concreto (Yi *et al.*, 2006).



Fonte: Yi *et al.* (2006).

Os resultados de incremento na resistência à compressão em função do diâmetro do cilindro, apresentados na Figura 3, evidenciam que a redução do diâmetro do corpo de prova a partir do diâmetro da referência ( $\emptyset 15 \times 30$  cm) implica em aumento da resistência à compressão. Assim sendo, corpos de prova de dimensões  $\emptyset 10 \times 20$  cm tendem a apresentar resistência à compressão entre 3,1 e 3,3% maior em comparação a corpos de prova de dimensões  $\emptyset 15 \times 30$  cm. Comportamento oposto foi verificado para o aumento do diâmetro, ou seja, há redução na resistência à compressão.

No caso de corpos de prova cúbicos, o modelo matemático proposto por Yi *et al.* (2006) para o entendimento da variação da resistência à compressão em função da aresta do cubo consta da Equação 3.

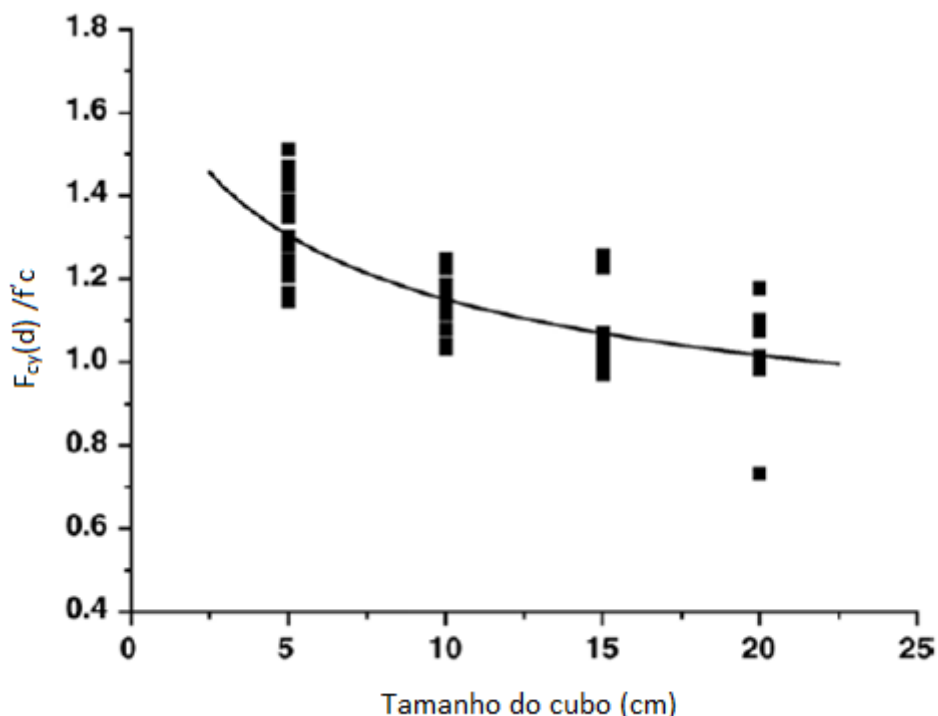
$$f_{cu}(d) = \frac{1.17f'_c}{\sqrt{1 + \frac{d}{2.6}}} + 0.62f'_c \quad (3)$$

em que:

- $f_{cu}(d)$  = Resistência à compressão de corpo de prova não normalizado, MPa;
- $f'_c$  = Resistência à compressão do corpo de prova normalizado, MPa; e
- $d$  = Diâmetro do corpo de prova não normalizado, cm.

Os resultados experimentais obtidos pelos autores e a curva que representa a variação da resistência à compressão em função da aresta do cubo, determinada pela Equação 3, são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Efeito do tamanho dos cubos sobre a resistência à compressão do concreto.



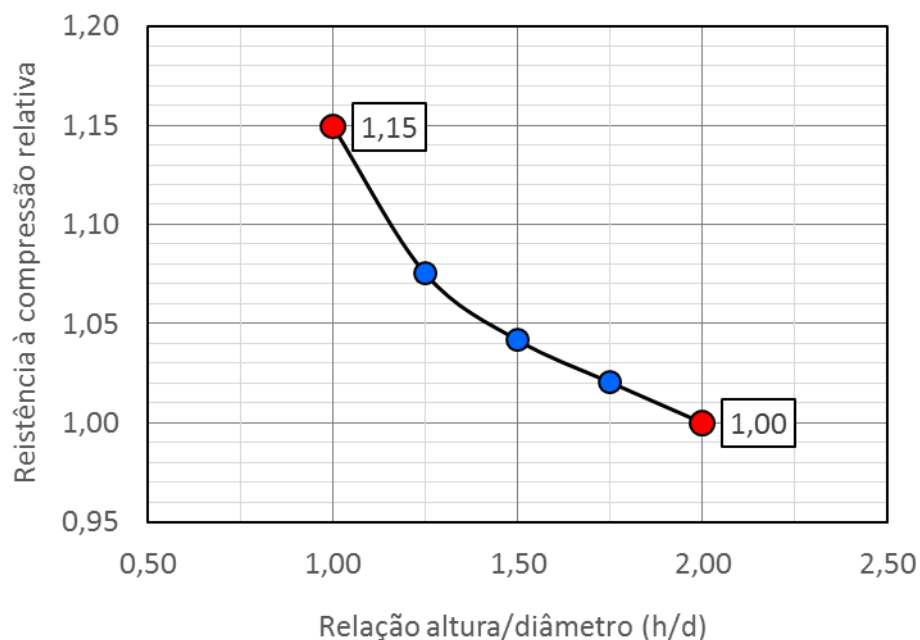
Fonte: Yi *et al.* (2006).

Assim como observado nos corpos de prova cilíndricos, a resistência à compressão aumenta quão menor a dimensão do cubo. Em ambas as formas, os modelos matemáticos propostos para o entendimento comportamental da resistência à compressão consideram que a dimensão máxima do agregado graúdo não pode exceder 26,0 mm (1 polegada). A resistência à compressão aumentou em 18%, quando se diminuiu a aresta do cubo de 20 para 10 cm. No cilindro, a redução do diâmetro de 15 para 7,5 cm resultou em aumento médio de 7% na resistência à compressão. Dessa forma, quando da redução da base do corpo de prova pela metade, tanto no cubo quanto

no cilindro, houve aumento na resistência à compressão, porém com percentuais distintos. Diante deste comportamento, fica evidente que a geometria e as dimensões do corpo de prova exercem influência na resistência à compressão do concreto.

A norma NBR 5739 (ABNT, 2007) estabelece fatores de correção da resistência à compressão para corpos de prova com relação altura/diâmetro diferente de 2,0. A Figura 5 apresenta os incrementos na resistência à compressão do concreto conforme a relação altura/diâmetro é diminuída, determinados por adaptação dos valores preconizados na NBR 5739 (ABNT, 2007).

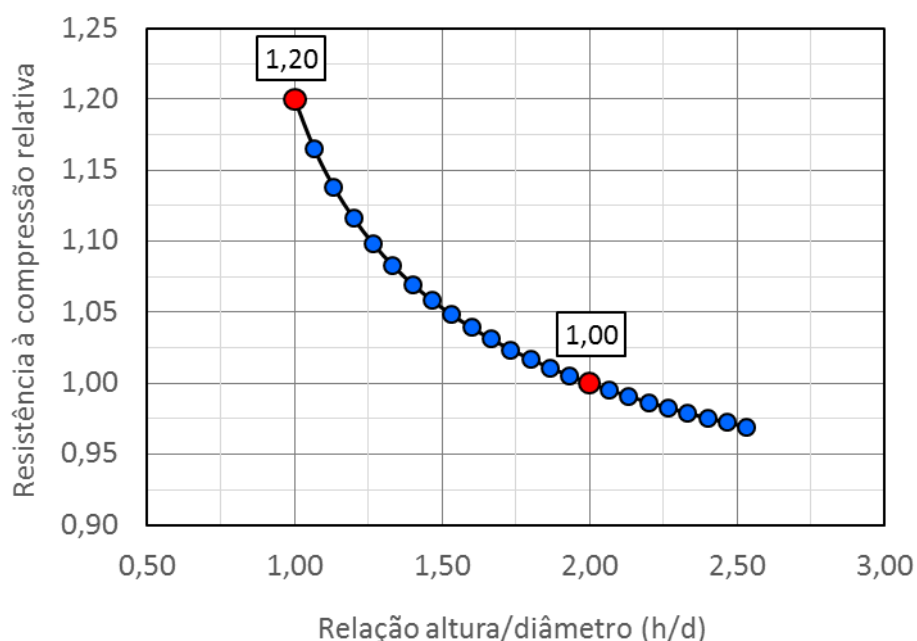
Figura 5 – Resistência à compressão relativa do concreto decorrente da redução da relação altura/diâmetro de corpo de prova cilíndrico.



Fonte: Adaptado da NBR 5739 (ABNT, 2007).

A redução da relação altura/diâmetro de 2,0 para 1,0 resulta em incremento de resistência à compressão de 15%. A partir dos modelos matemáticos propostos Kim e Eo (1990) e adaptado por Yi *et al.* (2006) foram estimados os incrementos na resistência à compressão quando da redução da relação altura/diâmetro. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Resistência à compressão relativa do concreto decorrente da redução da relação altura/diâmetro de corpo de prova cilíndrico.



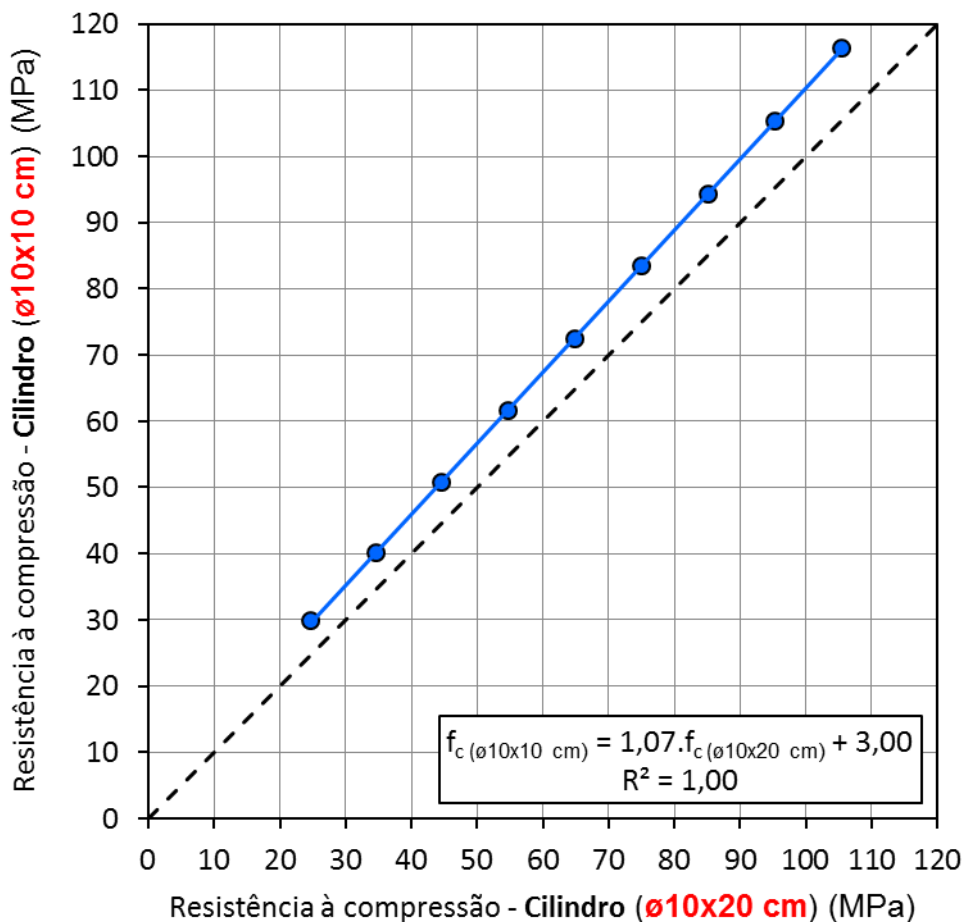
Fonte: Adaptado de Yi *et al.* (2006).

Os resultados (Figura 5) indicam progressivo aumento da resistência à compressão quando da redução de relação altura/diâmetro para valores menores que 2,0. Na relação altura/diâmetro igual a 1,0, o incremento na resistência à compressão é da ordem de 20%, valor superior ao preconizado pela norma NBR 5739 (ABNT 2007). Assim sendo, é possível afirmar que o incremento na resistência, de fato, ocorre, porém a intensidade deste incremento pode variar, ou seja, é possível obter diferentes resultados em relação aos apresentados na literatura pertinente.

Outra questão a ser discutida refere-se à influência da resistência à compressão do concreto sobre o incremento propiciado aos resultados quando da redução da relação altura/diâmetro dos corpos de prova cilíndricos. Neste sentido, o trabalho de Mansur e Islam (2002), ao avaliar a resistência à compressão de concretos de 20 a 100 MPa por meio de corpos de prova cilíndricos de  $\varnothing 10 \times 20$  cm e  $\varnothing 10 \times 10$  cm, concluiu que o incremento na resistência à compressão do concreto em decorrência da redução da relação altura/diâmetro não é linear. Cabe ressaltar que a obtenção dos corpos de prova de dimensões  $\varnothing 10 \times 10$  cm ocorreu por corte dos corpos de prova de dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm. A Figura 7 apresenta a relação existente entre a resistência à compressão de corpo de prova de referência ( $\varnothing 10 \times 20$  cm) e de corpo de prova com relação altura/diâmetro igual

a 1,0 ( $\emptyset 10 \times 10$  cm). Os resultados foram adaptados do trabalho de Mansur e Islam (2002), os quais propuseram fatores de correção da resistência à compressão para as dimensões acima citadas.

Figura 7 – Relação entre a resistência à compressão de corpos de prova de dimensões  $\emptyset 10 \times 20$  cm ( $h/d = 2,00$ ) e  $\emptyset 10 \times 10$  cm ( $h/d = 1,0$ ).

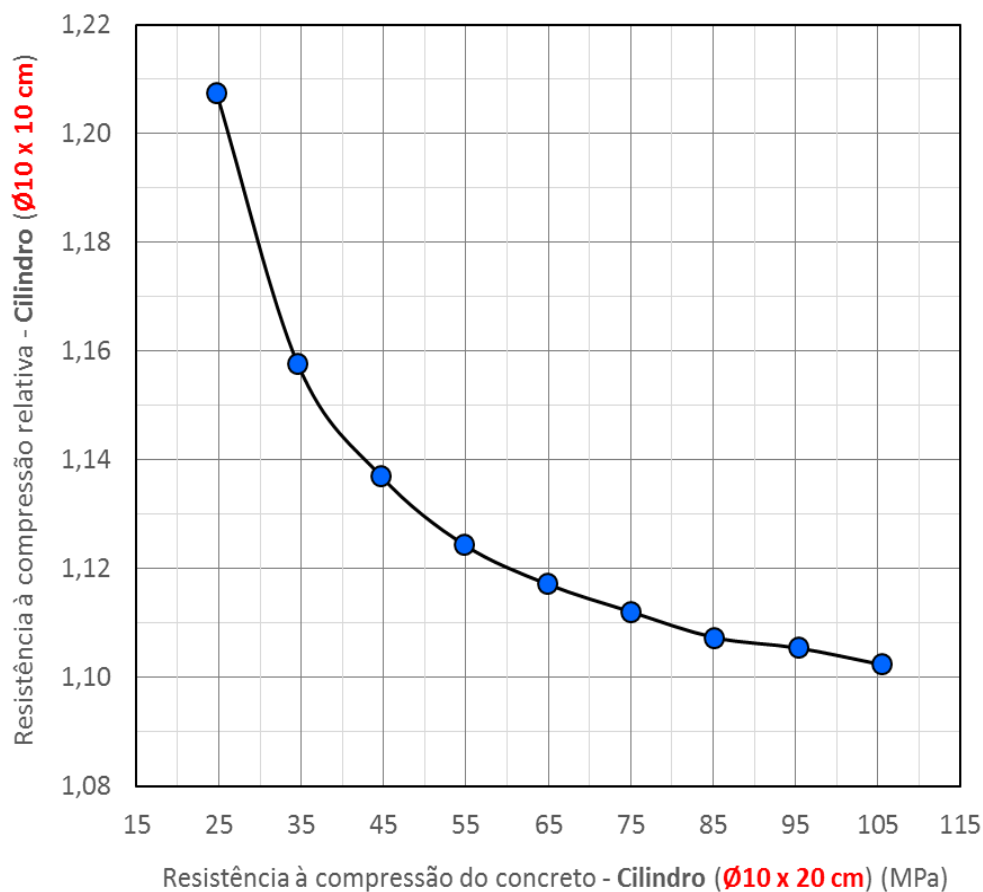


Fonte: Adaptado de Mansur e Islam (2002).

Os resultados apresentados evidenciam que a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro igual a 1,0 é maior que a observada nos corpos de prova de relação altura/diâmetro igual a 2,0. A linha de tendência que relaciona a resistência à compressão das diferentes morfologias considera que os corpos de prova de dimensões  $\emptyset 10 \times 10$  cm possuem capacidade resistente incrementada em 7,0%, além de 3,0 MPa. Assim sendo, o incremento constante (3,0 MPa) passará a ser mais representativo quanto menor a resistência à compressão do concreto, ou seja, o efeito da relação altura/diâmetro é mais proeminente nos concretos de baixa resistência à

compressão. A Figura 8 apresenta a variação no incremento da resistência à compressão dos cilindros de relação altura/diâmetro = 1,0 em relação aos cilindros de relação altura/diâmetro = 2,0 para a faixa de 25 a 105 MPa. De fato, o incremento é maior nas menores resistências à compressão. Para 25,0 MPa, por exemplo, o incremento na resistência à compressão foi de 21%. Ao aumentar a resistência à compressão para 35,0 MPa, a resistência sofreu aumento de 16%. Na resistência à compressão de 45,0 MPa, o incremento foi de 14%, atingindo 10% para 105,0 MPa.

Figura 8 – Incremento na resistência à compressão de cilindros de relação altura/diâmetro = 1,0 ( $\varnothing 10 \times 10$  cm) em relação ao cilindro de relação altura/diâmetro = 2,0 ( $\varnothing 10 \times 20$  cm) para faixa de resistência à compressão entre 25 e 105 MPa.



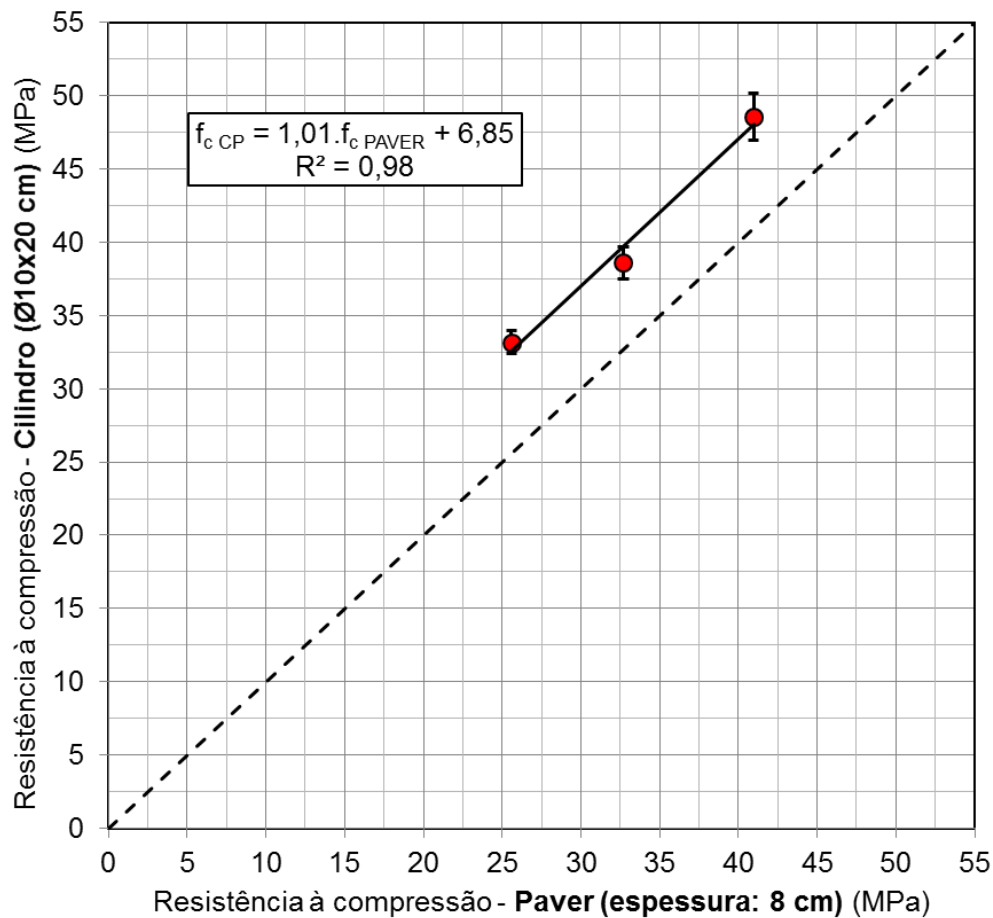
Fonte: Adaptado de Mansur e Islam (2002).

A bibliografia pertinente ao assunto tratado neste trabalho é ampla no tocante à influência da relação altura/diâmetro de corpos de prova cilíndricos sobre a resistência à compressão. Também aborda com propriedade a relação entre a resistência à compressão entre corpos de prova cúbicos, prismáticos e cilíndricos, bem como a

influência da resistência à compressão do concreto nos incrementos ocorridos quando da variação da morfologia dos corpos de prova. O interesse nestes temas se deve às diferentes formas, dimensões e relações altura/diâmetro dos corpos de prova normatizados nos diferentes países. Assim sendo, é de interesse tecnológico a obtenção de fatores de correção que permitem estimar a resistência à compressão de uma determinada morfologia, com dimensões específicas, a partir da determinação da resistência à compressão por meio de ensaio realizado em outro tipo (forma, dimensão e/ou relação altura/diâmetro) de corpo de prova. Diante desta contextualização, verifica-se que praticamente não há estudos que relacionam a resistência à compressão de corpos de prova corriqueiramente utilizados (normalizados) com a resistência à compressão de peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação.

Neste sentido se destaca o trabalho de Xavier (2017), o qual teve por objetivo analisar a viabilidade da incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) na substituição parcial de agregado graúdo de concreto para a execução de peças pré-moldadas destinadas à pavimentação. A autora apresenta resultados referentes à resistência à compressão do concreto determinada por meio de corpos de prova cilíndricos de dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm e por peças pré-moldadas para pavimentação. Os cilindros de concreto foram retificados previamente ao ensaio, enquanto as peças pré-moldadas foram simplesmente desempenadas após a moldagem. Desta forma, uma das superfícies apresenta irregularidades que podem, durante o ensaio, interferir na resistência à compressão do concreto. A partir desta possibilidade, a autora recomendou a realização de trabalho que avaliasse a influência do preparo da superfície irregular das peças no resultado de resistência à compressão. Dentre os resultados de Xavier (2017) há a relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de cilindro com dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm e as peças pré-moldadas com espessura de 8,0 cm. Cabe ressaltar que foi ensaiada apenas uma peça pré-moldada para cada uma das três relações água/cimento (0,40; 0,50 e 0,60) utilizadas no estudo. Desta forma, a representatividade comportamental pode ser questionada, entretanto, a tendência pode ser considerada relevante. A Figura 9 apresenta os resultados de Xavier (2017) para a resistência à compressão dos cilindros em função da resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação.

Figura 9 – Resistência à compressão dos cilindros em função da resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação.



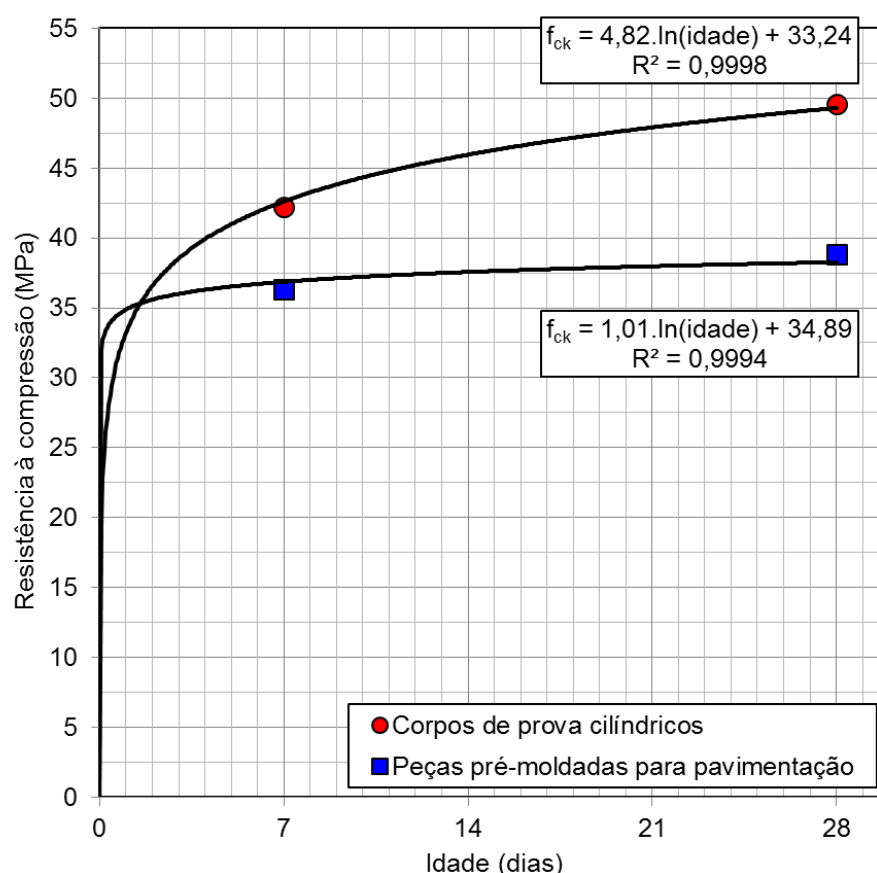
Fonte: Xavier (2017).

De fato, as resistências à compressão dos cilindros foram maiores que as observadas nas respectivas peças pré-moldadas. O coeficiente angular da linha de tendência é unitário, ou seja, praticamente não interfere no incremento da resistência à compressão dos cilindros em comparação às peças pré-moldadas. O acréscimo na resistência à compressão, neste caso, passou a ser representado, única e exclusivamente, por um valor constante (6,85 MPa), de tal forma que quão menor a resistência à compressão das peças pré-moldadas, maior o incremento percentual na resistência dos cilindros. Este comportamento diverge do apresentado por Mansur e Islam (2002), os quais afirmam que a redução da relação altura/diâmetro de 2,0 (corpo de prova Ø10 x 20 cm) para 1,0 (Ø10 x 10 cm) resulta em aumento da resistência à compressão. No estudo de Xavier (2017), os corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro igual a 2,0 (Ø10 x 20 cm) apresentaram maiores resistências quando comparados às peças pré-

moldadas, as quais apresentam relação espessura/diâmetro da placa auxiliar próximo a 1,0. A autora atribuiu este comportamento inesperado à falta de preparo da superfície irregular das peças pré-moldadas.

As evoluções das resistências à compressão do concreto misturado na relação água/cimento = 0,40 para corpos de prova cilíndricos e peças pré-moldadas de concreto para pavimentação, a partir de dados apresentados por Xavier (2017), são apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Evolução das resistências à compressão de concreto misturado na relação água/cimento = 0,40 para corpos de prova cilíndricos (Ø10 x 20 cm) e peças pré-moldadas para pavimentação (espessura = 8,0 cm).



Fonte: Adaptado de Xavier (2017).

As curvas apresentadas na Figura 8 evidenciam que a evolução da resistência à compressão foi influenciada pela forma e dimensões dos corpos de prova. Nos cilindros normalizados (Ø10 x 20 cm), a resistência à compressão aos 7 dias foi de 42,2 MPa, atingindo 49,6 MPa aos 28 dias. Assim sendo, a resistência à compressão aos 7 dias representou 85% do valor observado aos 28 dias, o que está sensato quando da utilização de cimento Portland do tipo CP V – ARI para a execução do concreto. Nas peças pré-

moldadas para pavimentação, a resistência à compressão aos 7 dias foi de 36,3 MPa e aos 28 dias foi de 38,8 MPa. Desta forma, a resistência à compressão aos 7 dias representou 94% da resistência à compressão observada aos 28 dias. É possível observar diferentes comportamentos em decorrência da morfologia dos corpos de prova, de tal forma que o mesmo concreto, ao ser moldado na forma cilíndrica ( $\varnothing 10 \times 20$  cm) e na forma de peça para pavimentação (espessura = 8,0 cm), resultam em diferentes resistências à compressão nas idades de 7 e 28 dias. Na idade de 7 dias houve maior proximidade da resistência à compressão para os diferentes corpos de prova utilizados, sendo que as peças pré-moldadas atingiram 86% do valor médio obtido nos corpos de prova cilíndricos. Na idade de 28 dias, ocorreu maior distanciamento entre as resistências à compressão dos diferentes corpos de prova. As peças pré-moldadas representaram, nesta idade, 78% da resistência à compressão dos cilindros, ou seja, uma redução média de 22%.

Por fim, fica evidente que a forma das peças pré-moldadas para pavimentação, de relação espessura/diâmetro da placa auxiliar próximo a 1,0, apresenta comportamento distinto do observado nos corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro igual a 1,0 ( $\varnothing 10 \times 10$  cm). Portanto, a confinamento do cilindro teórico representativo do volume de concreto submetido ao carregamento durante o ensaio de resistência à compressão das peças pré-moldadas para pavimentação exerce influência no resultado obtido nas diferentes idades, além de impactar na evolução da resistência ao longo do tempo.

## **2.2 Peças pré-moldadas para a pavimentação**

Segundo Copel (2008), *pavers* são peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação intertravada, as quais são amplamente utilizadas nos países de primeiro mundo, principalmente em praças, passeios, ruas, avenidas, estacionamentos, pátios industriais, etc.

Os principais benefícios da aplicação do pavimento intertravado com *pavers* de concreto, tanto para o tráfego de pessoas como para veículos pesados, são:

- Permeabilidade e conforto térmico: harmonia com o meio-ambiente;
- Utilização imediata: liberação para o tráfego logo após a sua aplicação
- Facilidade de manutenção: as peças podem ser removidas e reutilizadas;
- Segurança: a superfície do *paver* é antiderrapante;
- Versatilidade arquitetônica: vários modelos, cores e combinações;

- Fácil assentamento: equipamentos de pequeno porte ou até manual;
- Durabilidade: altamente resistente ao clima e a agentes agressivos.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2010), intertravamento é a capacidade que os blocos adquirem de resistir a movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal ou de rotação em relação a seus vizinhos. O intertravamento é fundamental para o desempenho e a durabilidade do pavimento. Para que se consiga o intertravamento duas condições são necessárias e indispensáveis: contenção lateral e junta preenchida com areia.

### **2.2.1 Formatos das peças pré-moldadas para pavimentação (pavers)**

De acordo com a ABCP (2010), o pavimento intertravado com peças de concreto apresenta grandes possibilidades de ordem estética, uma vez que as variações de forma e cor das peças assim o permitem.

São definidos três tipos básicos de formatos de blocos:

- Tipo 1: constituído por formas retangulares, apresenta facilidade de produção e colocação em obra, além de facilitar a construção de detalhes nos pavimentos. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e as suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas;
- Tipo 2: genericamente apresenta o formato “I” e somente pode ser montado em fileiras travadas. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura.
- Tipo 3: é o bloco que, pelo seu peso e tamanho, não pode ser apanhado com uma mão só (suas dimensões são de, pelo menos, 20 x 20 cm).

A Figura 11 apresenta os formatos básicos das peças pré-moldadas de concreto para pavimentação.

Figura 11 – Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação.



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2010).

### 2.2.2 Diretrizes mínimas para as peças pré-moldadas para pavimentação preconizadas pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013)

Segundo a NBR 9781/2013, as peças de concreto devem atender, dentre outras exigências, as seguintes especificações:

- Resistência à compressão maior ou igual a 35,0 MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, e maior ou igual a 50,0 MPa para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.
- A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6,0%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7,0 %.
- A resistência à abrasão deve ter como critérios: cavidade menor ou igual a 23,0 mm para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, e menor ou igual a 20,0 mm para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

- Apresentar aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos e devem ser livres de rebarbas, defeitos, delaminação e descamação.
- As dimensões e tolerâncias das peças de concreto devem atender: medida nominal de comprimento de no máximo 250 mm, medida real da largura de no mínimo 97 mm na área da peça destinada à aplicação de carga no ensaio de resistência à compressão, medida nominal da espessura de no mínimo 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm.:
- A máquina de ensaio de compressão deve atender os valores máximos admissíveis determinados pela ABNT NBR ISO 7500-1, o corpo de prova deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da máquina, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro.
- As duas placas auxiliares de ensaio devem ser circulares, com diâmetro de  $85,0 \pm 0,5$  mm e espessura mínima de 20 mm, confeccionadas em aço, com dureza superficial maior que 60 RC. Suas superfícies não podem apresentar afastamento com relação a uma superfície plana de contato, tomada como referência, de mais de 0,01 mm em 85 mm.
- As peças representativas do lote amostra devem estar nas seguintes condições, no momento do ensaio: saturadas na água a  $(23 \pm 5)$  °C, por no mínimo 24 horas antes do ensaio, as superfícies de carregamento devem ser retificadas, as peças devem ser dispostas sobre as placas auxiliares de ensaio, com sua face superior em contato com a placa auxiliar superior, de modo que o eixo vertical que passa pelo centro coincida com o eixo vertical passante pelo centro das placas, na região da peça apresenta largura mínima de 97 mm.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

O projeto experimental proposto visa obter subsídios para a análise da influência da relação altura/diâmetro (h/d) dos corpos de prova cilíndricos na resistência à compressão e para a realização de comparativo destes com os elementos pré-moldados de concreto destinados à pavimentação. Este capítulo contém a caracterização dos materiais, a dosagem utilizada para a realização do concreto, o preparo das superfícies irregulares das peças de concreto para pavimentação e, por fim, a rotina de realização dos ensaios.

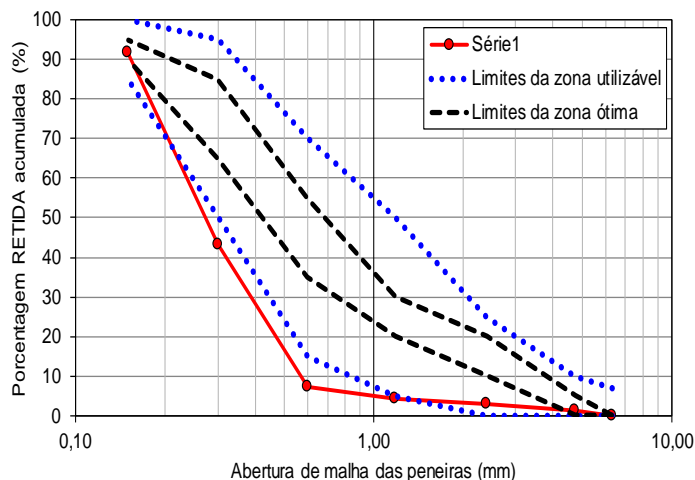
##### **3.1.1 Cimento Portland**

O cimento Portland utilizado no presente trabalho foi do tipo CP V – ARI, da marca Ciplan, de acordo com a norma ABNT NBR 5.733/1991. A massa específica teórica adotada para o cimento foi de  $3,05 \text{ g/cm}^3$ . A caracterização físico-química do cimento não foi realizada em virtude da falta de infraestrutura laboratorial da Instituição, o que impede a realização dos ensaios. A escolha por este tipo de cimento se justifica em virtude da utilização deste tipo de cimento para a execução de peças pré-moldadas, as quais demandam curto intervalo de tempo para a desfôrma, a fim de disponibilizar as fôrmas para nova moldagem.

##### **3.1.2 Agregado miúdo**

O agregado miúdo (areia) utilizado foi obtido no comércio local, apresentando massa específica, determinada em duplicada, de  $2,52 \text{ g/cm}^3$  e massa unitária no estado solto, determinada em triplicada, de  $1,60 \text{ g/cm}^3$ . A distribuição granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia).



**Agregado miúdo:**

Dimensão máxima característica: 1,20 mm

Módulo de finura: 1,52

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona utilizável proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

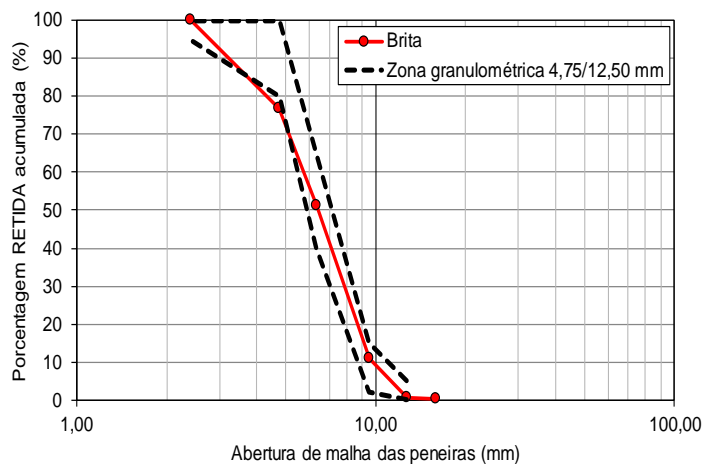
Fonte: Própria.

**3.1.3 Agregado Graúdo**

O agregado graúdo britado utilizado na execução dos concretos é de origem calcária e apresentou massa específica de  $2,63 \text{ g/cm}^3$ , absorção de água de 0,25 % e massa unitária no estado solto de  $1,41 \text{ g/cm}^3$ .

A distribuição granulométrica do agregado graúdo, de dimensão máxima característica de 12,7 mm, é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo (brita).



**Agregado graúdo:**

Dimensão máxima característica: 12,50 mm

Módulo de finura: 5,88

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona granulométrica 4,75/12,50 mm proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

Fonte: Própria.

### 3.2 Dosagem do concreto

O estudo de dosagem para produção dos concretos seguiu as recomendações propostas pelo método IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992). Esse método considera a relação a/c como o parâmetro mais importante para o concreto estrutural. Definidos os materiais e a relação a/c, a resistência e durabilidade do concreto passam a ser únicas, sempre que seja mantida a mesma trabalhabilidade da mistura.

Para a produção dos concretos deste trabalho não foi realizado, em laboratório, a determinação do teor de argamassa seca ideal, adotando-se o valor de 52% utilizado por Xavier (2017). A relação água/materiais secos de 10,0% foi determinada experimentalmente para a obtenção de abatimento do tronco de cone de  $11 \pm 1$  cm. As relações água/cimento utilizadas foram 0,40; 0,50 e 0,60. A partir dos parâmetros pré-estabelecidos (teor de argamassa seca e relação água/materiais secos) foram determinadas as proporções de mistura para cada uma das relações água/cimento. As proporções cimento/agregados (miúdo + graúdo) obtidas foram: 1,0: 3,0; 1,0: 4,0 e 1,0: 5,0. As proporções de mistura unitárias e os respectivos consumos de materiais por unidade de volume de concreto ( $m^3$ ) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Proporções de mistura e consumo de materiais por unidade de volume de concreto ( $m^3$ ).

a/c	Agregados			Consumo de materiais ( $kg/m^3$ )			
	m <sup>1</sup> (kg)	a <sup>2</sup> (kg)	p <sup>3</sup> (kg)	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
0,40	3,0	1,1	1,9	530,0	583,0	1.007,0	212,0
0,50	4,0	1,6	2,4	421,0	673,6	1.010,4	210,5
0,60	5,0	2,1	2,9	349,2	733,3	1.012,6	209,5

<sup>1</sup> m: massa de agregados (miúdo e graúdo) em relação à unidade de massa de cimento (kg);

<sup>2</sup> a: massa de agregado miúdo (areia) em relação à unidade de massa de cimento (kg);

<sup>3</sup> p: massa de agregado graúdo (brita) em relação à unidade de massa de cimento (kg).

Fonte: Própria.

### **3.3 Mistura do concreto**

A mistura dos materiais para a execução dos concretos foi iniciada pela introdução do agregado graúdo na betoneira, seguido da adição de metade do volume de água de amassamento. A betoneira foi acionada por aproximadamente 20 segundos para que ocorresse a completa umidificação da superfície do agregado graúdo. Na sequência, com a betoneira desligada, foi lançado, homogeneamente distribuído, o cimento sobre o agregado graúdo umidificado. A betoneira foi novamente acionada para a realização da mistura do cimento com o agregado graúdo. Posteriormente o agregado miúdo foi sendo lançado gradativamente, com o auxílio de concha para concreto, sobre a mistura (cimento + agregado graúdo) em movimento. A adição da areia foi intercalada com doses da água remanescente, até que houvesse o lançamento completo dos materiais na betoneira. Por fim, o concreto foi misturado por aproximadamente 5,0 minutos para que ocorresse a completa homogeneização dos materiais.

### **3.4 Consistência**

A consistência dos concretos foi determinada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme metodologia prescrita na norma NBR NM 67 (ABNT, 1998).

### **3.5 Moldagem e cura dos corpos de prova**

Para cada uma das proporções de mistura foram moldados 9 (nove) corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing 10 \times 20$  cm) e 18 (dezoito) peças pré-moldadas para pavimentação, do tipo raquete, com 8,0 cm de espessura. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2003), enquanto as peças pré-moldadas foram moldadas em duas camadas com adensamento manual por meio de impactos consecutivos da fôrma sobre o piso. Por fim, a superfície foi desempenada com auxílio de colher de pedreiro. A cura, iniciada 24 horas após a moldagem, foi realizada por meio de submersão dos corpos de prova em água saturada com cal, conforme diretrizes da norma NBR 5738 (ABNT, 2003).

### 3.6 Corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro igual a 1,0

Os corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro igual a 1,0 foram obtidos pelo corte de três cilindros de dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm por meio de serra circular com disco diamantado. A Figura 14 apresenta o equipamento utilizado no corte e a Figura 15 apresenta os corpos de prova cilíndricos após o corte.

Figura 14 – Equipamento utilizado para o corte dos corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Própria

Figura 15 – Corpos de prova cilíndricos com relação h/d igual a 1,0 e 2,0.



Fonte: Própria

### **3.7 Preparo da superfície irregular das peças pré-moldadas para pavimentação.**

A norma NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece no Anexo A, item A.3, que as superfícies de carregamento devem ser retificadas, entretanto permite que outros tipos de capeamento sejam realizados desde que não apresentem variações significativas em comparação à técnica de retífica.

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram moldados em fôrmas poliméricas, o que garante que em uma das superfícies de carregamento não seja necessário realizar o preparo da superfície. A outra superfície, apesar da realização do desempenho ao término da moldagem, apresenta irregularidades que podem interferir na distribuição homogênea de carga. Assim sendo, o presente trabalho contempla o preparo da superfície irregular por retificação e capeamento com argamassa. Para cada proporção de mistura foram moldadas 18 peças pré-moldadas para pavimentação, das quais 6 foram ensaiadas sem preparo da superfície, ou seja, simplesmente desempenadas após a moldagem, 6 foram retificados com equipamento utilizados em marmorarias e 6 foram capeados com argamassa.

A retificação das peças pré-moldadas demandou a busca por alternativa viável em decorrência da indisponibilidade regional de equipamento adequado. A solução foi encontrada em marmoraria por meio da utilização de ferramenta aplicada no polimento de mármores e granitos destinados à execução de equipamentos e acessórios corriqueiramente utilizados em estabelecimentos residências e comerciais. A Figura 16 apresenta a politriz, que foi utilizada na retificação das peças pré-moldadas.

Figura 16 – Politriz utilizado para a retificação das peças pré-moldadas de concreto para pavimentação.



Fonte: Própria

As peças pré-moldadas de concreto foram assentadas em bancada apropriada e submetidas à retificação manual. O acabamento superficial, ao retirar as irregularidades, garante homogênea aplicação de carga sobre a área delimitada pela placa auxiliar recomendada pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

O capeamento das peças pré-moldadas com argamassa foi realizado por meio da proporção de mistura, em massa, de 1,0: 1,5: 0,40 (cimento: agregado miúdo (areia): relação água/cimento), com a adição de aditivo polifuncional em teor de 0,5% em relação à massa de cimento. O cimento Portland utilizado no capeamento foi da marca Ciplan e o aditivo polifuncional foi o Mira Set 28 da Grace Construction Products.

A mistura da argamassa foi realizada manualmente. Primeiramente foram misturados o cimento e a metade do volume de água de amassamento, a qual continha o

aditivo polifuncional. Após a mistura da pasta, a areia e o restante da água foram lançados em porções, sendo intercaladas com homogeneização, a fim de obter uma argamassa bem misturada.

O lançamento da argamassa foi realizado sobre bancada de granito untada com óleo para evitar a aderência entre os materiais. Após o espalhamento, as peças pré-moldadas, saturadas em decorrência da cura submersa, foram assentadas sobre a argamassa e niveladas com o auxílio de nível de bolha. Transcorridos 30 minutos, o excedente de argamassa foi retirado com auxílio de espátula metálica, o que garante o acabamento nas arestas da superfície capeada. As peças pré-moldadas foram retiradas da bancada 24 horas após o capeamento e submetidas novamente à cura submersa, sobretudo para garantir a evolução da resistência à compressão da argamassa de capeamento. Cabe destacar que o capeamento foi realizado quando as peças pré-moldadas estavam com 21 dias de idade. Assim sendo, quando da realização do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, o capeamento de argamassa apresentava 7 dias de idade. A Figura 17 apresenta as peças pré-moldadas assentadas sobre a argamassa de capeamento em bancada de granito.

Figura 17 – Peças pré-moldadas para pavimentação capeadas com argamassa.



Fonte: Própria

A Figura 18 apresenta os diferentes preparos de superfície das peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação.

Figura 18 – Peças pré-moldadas para pavimentação submetidas à diferentes preparos de superfície.



Fonte: Própria.

### 3.8 Ensaio realizados

#### 3.8.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão, realizado aos 28 dias, seguiu as recomendações da norma NBR 5739 (ABNT, 2007) para os corpos de prova cilíndricos e da norma NBR 9781 (ABNT, 2013) para as peças pré-moldadas destinadas à pavimentação. Os corpos de prova cilíndricos foram retificados, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Corpos de prova cilíndricos, de dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm e  $\varnothing 10 \times 10$  cm, retificados para a realização do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Própria.

As peças pré-moldadas, após os diferentes preparos de superfície, foram ensaiadas utilizando placas auxiliares de aço para padronizar (delimitar) a área de aplicação de carga. As placas possuíam diâmetro de 8,49 cm, sendo utilizadas em cada uma das superfícies de aplicação de carga, conforme observado na Figura 20.

Figura 20 – Ensaio de resistência à compressão peça pré-moldada para pavimentação, e para corpos de prova cilíndricos com relação altura/diâmetro iguais a 1,0 e 2,0.



Fonte: Própria.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados de consistência do concreto, de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e, também, das peças pré-moldadas de concreto para pavimentação e, por fim, um comparativo da resistência à compressão entre os corpos de prova cilíndricos e as peças pré-moldadas.

### 4.1 Propriedades dos concretos

#### 4.1.1 Consistência

A consistência dos concretos foi medida por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone. O valor do abatimento como parâmetro de trabalhabilidade foi estabelecido em  $11 \pm 1$  cm. A Figura 21 apresenta o resultado do *slump test* do concreto misturado na relação água/cimento igual a 0,60. A faixa de abatimento pré-estabelecida foi atendida por todas as proporções de mistura propostas no planejamento experimental.

Figura 21 – Ensaio de abatimento do tronco de cone de um dos concretos estudados.



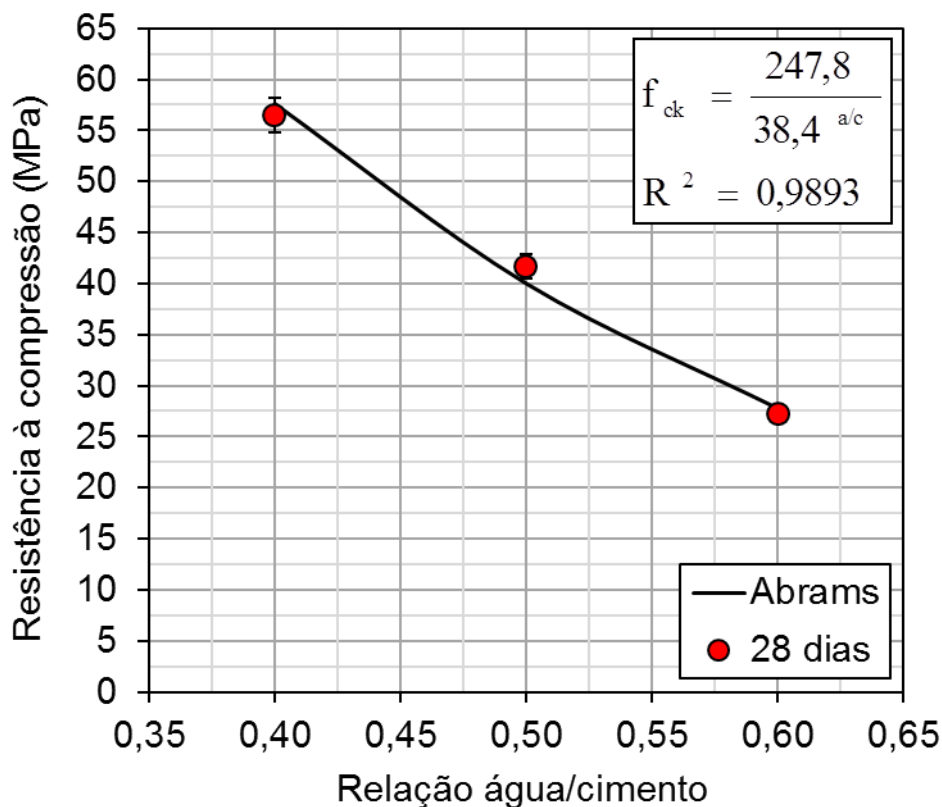
Fonte: Própria

## 4.2 Resistência à compressão

### 4.2.1 Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos

As resistências à compressão dos corpos de prova cilíndricos de dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm, com relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) = 2,0, moldados nas relações água/cimento ( $a/c$ ) 0,40; 0,50 e 0,60, são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) = 2,0.



Fonte: Própria

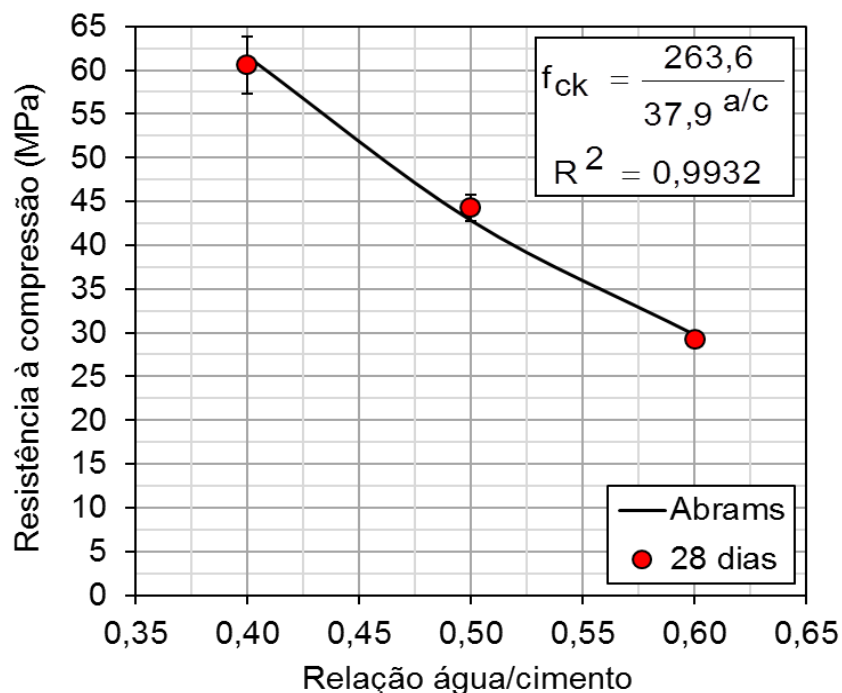
Na relação  $a/c = 0,40$ , a resistência à compressão média foi de 56,4 MPa. Para  $a/c = 0,50$ , a resistência média foi de 41,7 MPa e, na relação  $a/c = 0,60$ , o valor médio passou a ser de 27,2 MPa. Portanto, para a faixa de relação água/cimento estudada (0,40 a 0,60), a resistência à compressão variou de 56,4 MPa para 27,2 MPa, o que representa uma redução de 48%. Assim sendo, o aumento da relação água/cimento propicia uma redução da resistência à compressão. A Lei de Abrams estabelece a relação entre estas variáveis por meio de um modelo matemático potencial. A equação que representa a Lei de Abrams referente aos resultados obtidos experimentalmente, apresentada na Figura 21,

possui coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,9893, indicando que o modelo matemático representa adequadamente o comportamento do concreto.

De acordo com Neville e Brooks (2013), o valor de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos é influenciada pela relação altura/diâmetro. Os corpos de prova normalizados no Brasil apresentam relação altura/diâmetro igual a 2,0 (dois). Conforme os referidos autores, a redução desta relação implica em aumento de resistência à compressão. A norma NBR 5739 (ABNT, 2007) preconiza fatores de correção da resistência à compressão em função da relação altura/diâmetro do corpo de prova. No presente estudo, para fins de análise da influência da relação altura/diâmetro sobre a resistência à compressão, foram realizados ensaios de corpos de prova com relação altura/diâmetro igual a 1,0 (um), obtidos a partir do corte de corpos de prova de dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm.

As resistências à compressão dos corpos de prova cilíndricos de dimensões  $\varnothing 10 \times 10$  cm, com relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) = 1,0, moldados nas relações água/cimento (a/c) 0,40; 0,50 e 0,60 são apresentadas na Figura 23.

Figura 23 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) = 1,0.

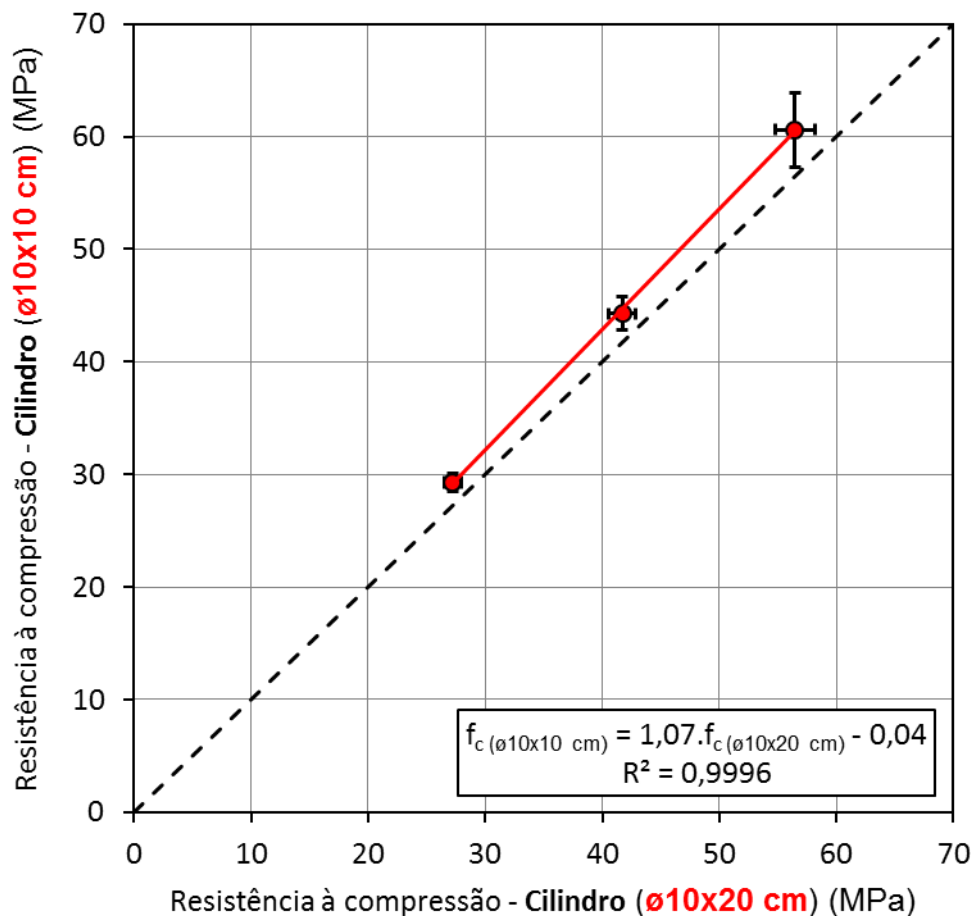


Fonte: Própria

Na relação  $a/c = 0,40$ , a resistência à compressão média foi de 60,6 MPa. Para  $a/c = 0,50$ , a resistência média foi de 44,3 MPa e, na relação  $a/c = 0,60$ , o valor médio passou a ser 29,3 MPa. Dessa forma, para a faixa de relação água/cimento (0,40 a 0,60), a resistência à compressão variou de 60,6 MPa para 29,3 MPa. De maneira geral, é possível observar que houve incremento na resistência à compressão quando a relação altura/diâmetro dos corpos de prova foi reduzida de 2,0 para 1,0, o que está de acordo com Mansur e Islam (2002) e Yi *et al.* (2016).

A relação entre a resistência à compressão dos cilindros de dimensões  $\phi 10 \times 20$  cm e  $\phi 10 \times 10$  cm é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Resistência à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova cilíndricos de relação altura/diâmetro = 2,0 e altura/diâmetro = 1,0.

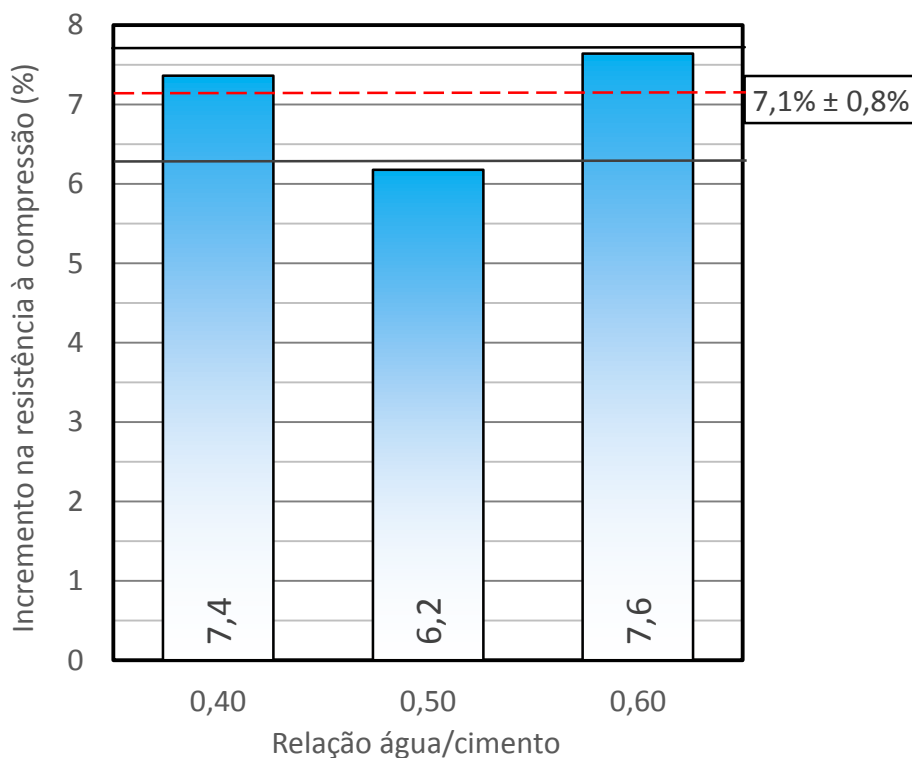


Fonte: Própria.

Os resultados apresentados na Figura 22 demonstram que a redução da relação altura/diâmetro, de fato, resultou em acréscimo da resistência à compressão. A linha de tendência que relaciona as resistências à compressão é linear e possui coeficiente angular igual a 1,07, o que representa que há, em média, um aumento de 7,0 % na resistência

média à compressão média, seguido de uma redução, representada pelo coeficiente linear, de 0,04 MPa. As análises pontuais, ou seja, em função dos resultados de resistência à compressão obtidos para uma das relações estudadas, são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Incremento percentual na resistência à compressão de cilindros com dimensões  $\varnothing 10 \times 10$  cm em comparação aos cilindros normalizados ( $\varnothing 10 \times 20$  cm).



Fonte: Própria

A dispersão dos incrementos de resistência à compressão observados nas diferentes relações água/cimento foi pequena. Na relação a/c = 0,40, o incremento médio na resistência à compressão foi de 7,4%, decaindo para 6,2% na relação a/c = 0,50 e, por fim, assumindo o valor de 7,6% na relação a/c = 0,60. A partir dos resultados individuais, foi obtido o incremento médio de  $7,1\% \pm 0,8\%$ , o que resulta em um coeficiente de variação de 11,0%. A norma NBR 5739 (ABNT, 2007) estabelece um incremento de 15% quando há a redução da relação altura/diâmetro de 2,0 para 1,0. Já Yi *et al.* (2006) sugerem que o incremento, neste caso, deveria ser de 20%. Ambas as proposições não consideram a influência da resistência à compressão do concreto, ou seja, estes incrementos devem ser considerados independentemente da resistência à compressão obtida no ensaio. No presente estudo, o incremento foi de 7,1%, valor inferior ao

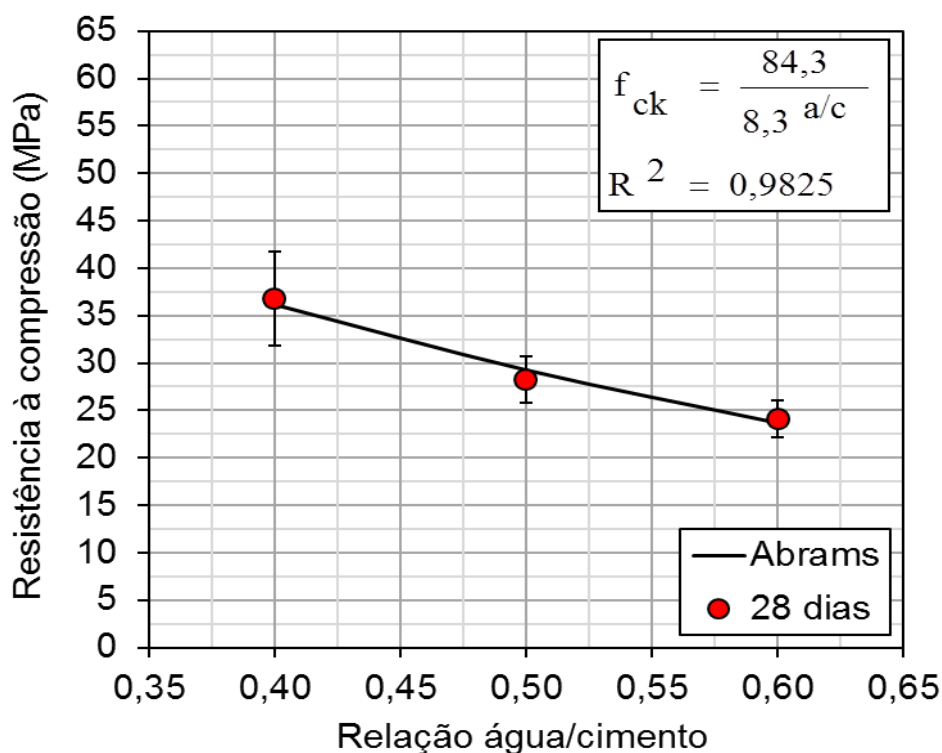
proposto pela norma brasileira e por Yi *et al.* (2006). Diante desta divergência, fica evidente que o incremento na resistência pode apresentar variação, o que pode ser influenciado pelo tipo de preparo das superfícies de carregamento (retificação, capeamento com enxofre ou discos de neoprene) e pela condição de obtenção dos cilindros de dimensões  $\varnothing 10 \times 10$  cm, o que pode ocorrer por moldagem nestas dimensões ou pelo corte dos cilindros normalizados.

#### 4.2.2 Resistência à compressão de peças pré-moldadas destinadas à pavimentação

O acabamento da superfície irregular das peças pré-moldadas pode influenciar na resistência à compressão do concreto e, desta forma, este tópico do trabalho visa apresentar a análise dos resultados quando do preparo da superfície irregular, por retificação ou capeamento, em comparação aos resultados obtidos nas peças que foram submetidas ao desempenho logo após a moldagem.

A variação da resistência à compressão, em função das diferentes relações água/cimento estudadas, para as peças pré-moldadas submetidas ao desempenho após a moldagem dos corpos de prova é apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação com superfície desempenada.

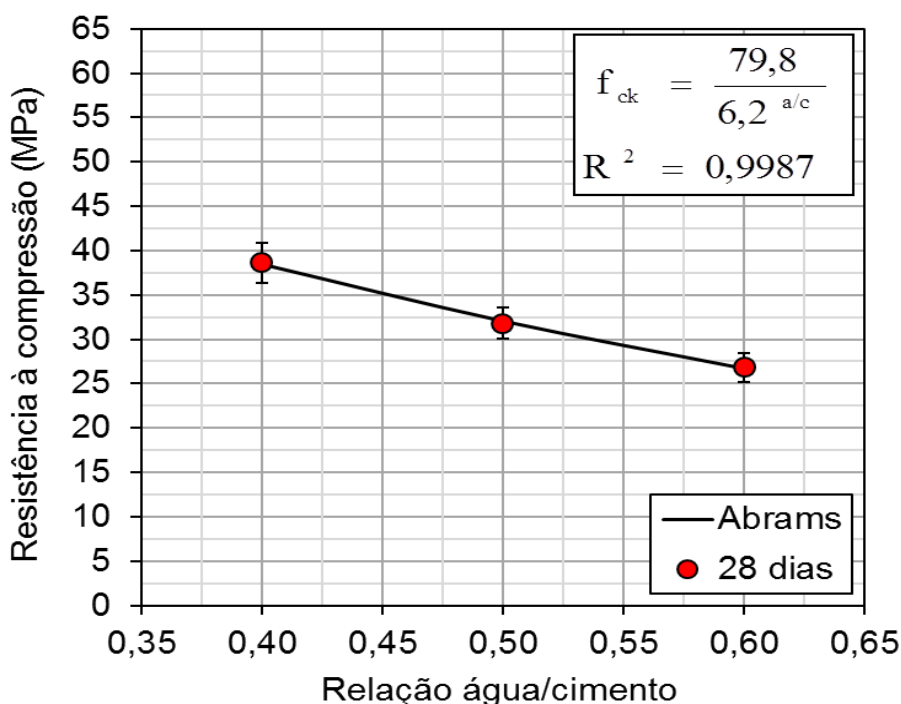


Fonte: Própria.

A resistência à compressão foi gradualmente reduzida quando a relação água/cimento de mistura foi aumentada. Este comportamento é representado pela Lei de Abrams, a qual, de fato, representa o comportamento das peças pré-moldadas para pavimentação, conforme observado na equação apresentada na Figura 24. Na relação água/cimento = 0,40, a resistência à compressão média foi de 36,8 MPa e, para as relações água/cimento = 0,50 e 0,60, os valores foram de 28,3 MPa e 24,1 MPa, respectivamente. A dispersão dos resultados no entorno da média atingiu, na relação água/cimento = 0,40, um coeficiente de variação de 13,5%, equivalente a um desvio padrão de 5,0 MPa. A dispersão dos resultados, com maior intensidade na menor relação água/cimento, evidencia que a irregularidade da superfície de aplicação de carga interfere na homogeneidade dos valores de resistência à compressão.

A aplicação de capeamento por meio de argamassa na superfície irregular das peças pré-moldadas tem por objetivo homogeneizar a aplicação de carga sobre o concreto. Tal medida é permitida pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013), embora seja preferível a realização de retificação. Os resultados de resistência à compressão das peças pré-moldadas capeadas com argamassa são apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação com superfície capeada.

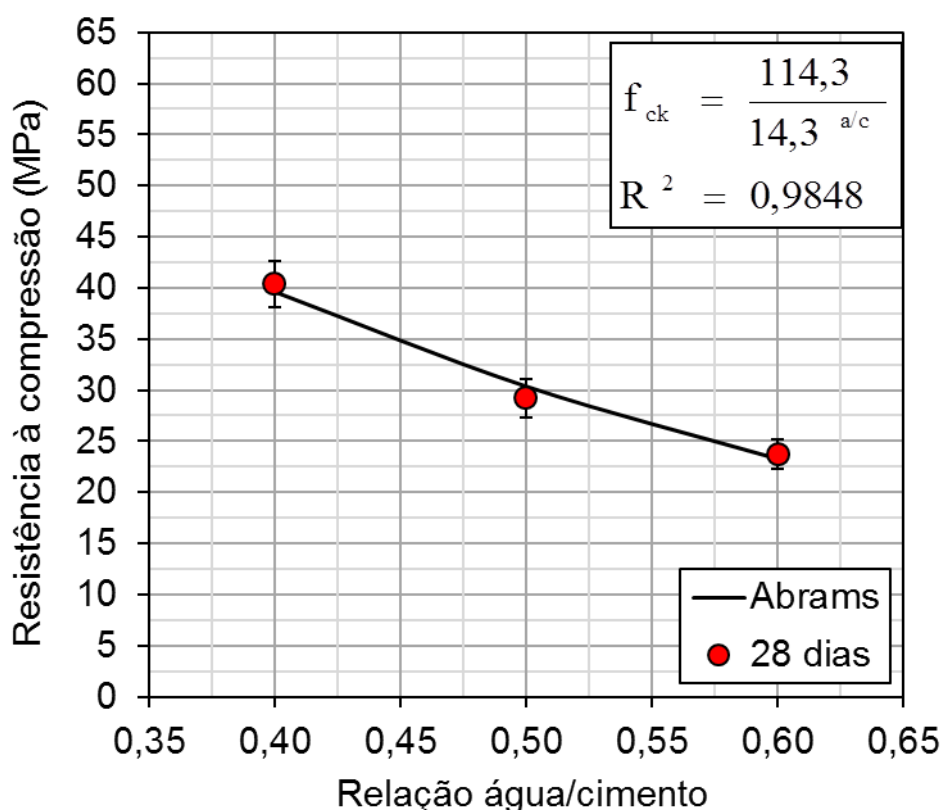


Fonte: Própria.

Na faixa de relações água/cimento de 0,40 até 0,60, a resistência à compressão variou entre 38,6 MPa e 26,8 MPa, valores similares aos observados nas peças simplesmente desempenadas. O capeamento reduziu a dispersão dos resultados em relação à dispersão observada nas peças sem preparo da superfície irregular, isto é, desempenadas. A curva que representa a Lei de Abrams apresentou coeficiente de determinação ( $R^2$ ) próximo à unidade, representando adequadamente o comportamento mecânico do concreto quando da variação da relação água/cimento de amassamento.

Os resultados de resistência à compressão das peças pré-moldadas para pavimentação obtidos conforme procedimento preconizado na norma NBR 9781 (ABNT, 2013), ou seja, com as superfícies irregulares retificadas, são apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Resistência à compressão, aos 28 dias, de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação com superfície retificada



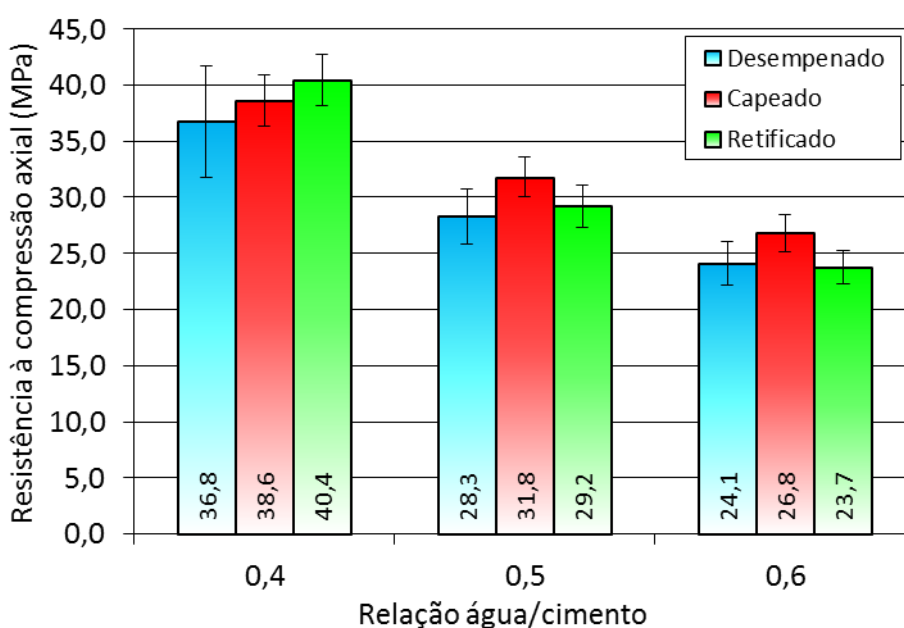
Fonte: Própria.

Os resultados de resistência à compressão em função das diferentes relações água/cimento pouco diferiram dos observados nas peças pré-moldadas desempenadas e

capeadas. De fato, a dispersão dos resultados foi semelhante ao observado nas peças capeadas, o que evidencia que a minimização das irregularidades da superfície de aplicação de carga homogeneiza a distribuição do carregamento sobre a área de ensaio, porém a resistência à compressão não foi alterada de forma representativa quando comparada aos resultados das peças desempenadas e capeadas.

A análise comparativa dos resultados de resistência à compressão das peças pré-moldadas desempenadas, capeadas e retificadas é apresentada nos gráficos da Figura 29. Os resultados das peças pré-moldadas retificadas foram utilizados como referência para a comparação com as peças desempenadas e capeadas com argamassa em decorrência da recomendação da norma NBR 9781 (ABNT, 2013) para a realização do ensaio nesta condição.

Figura 29 – Resistência à compressão, aos 28 dias, das peças pré-moldadas de concreto desempenadas, capeadas e retificadas.



Fonte: Própria.

A comparação dos resultados de resistência compressão entre as peças retificadas e desempenadas evidencia que houve equiparação dos resultados quando se considera o desvio padrão amostral. Os resultados abaixo de 30,0 MPa coincidem sobre a linha de equiparação de resistência à compressão, havendo pequeno desvio da média para a resistência à compressão de 40,0 MPa. Neste patamar de resistência à compressão, há uma tendência de obtenção de maior valor de resistência à compressão quando da

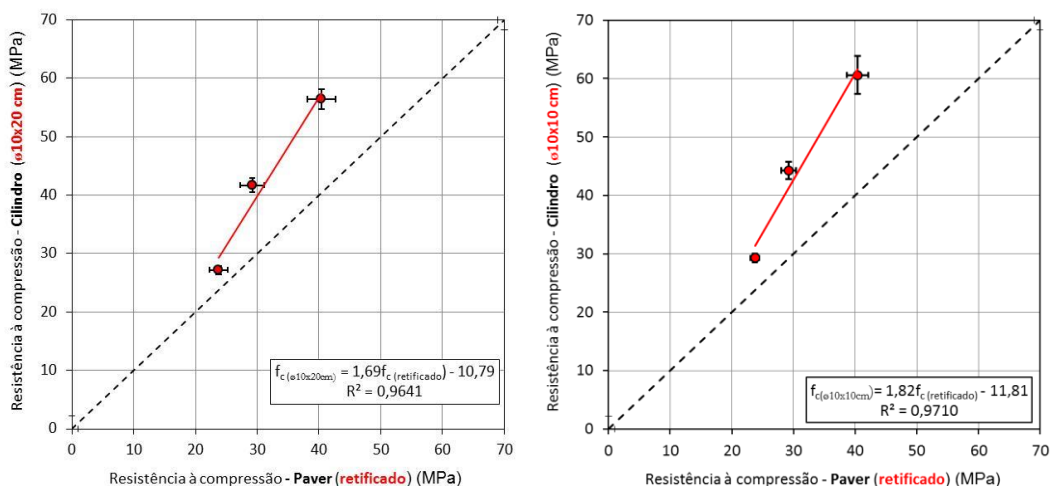
retificação da superfície irregular. Essa tendência deve ser avaliada em concretos com resistências à compressão superiores a 40,0 MPa.

A análise peças retificadas *versus* capeadas destaca que a aplicação de argamassa sobre a superfície irregular é eficiente e reduz a dispersão dos resultados a níveis similares aos observados nas peças retificadas. De fato, as resistências à compressão são similares e, portanto, o capeamento passa a ser uma técnica viável para o preparo das peças pré-moldadas previamente ao ensaio de compressão.

### 4.3 Comparação da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos com relação as peças pré-moldadas para pavimentação.

As resistências à compressão dos corpos de prova cilíndricos são maiores que as obtidas nas peças pré-moldadas, independentemente da relação altura/diâmetro. Essa tendência está de acordo com a apresentada por Xavier (2017), apesar da diferença em relação ao coeficiente angular da linha de tendência. Na Figura 30 são apresentadas as relações entre as peças pré-moldadas retificadas e os cilindros com diferentes relações altura/diâmetro.

Figura 30 – Resistência à compressão dos cilindros com relação h/d=2,0 em função da resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação.



Fonte: Própria.

A análise dos gráficos demonstra que, independentemente da relação altura/diâmetro dos corpos de prova cilíndricos, há uma tendência de ocorrência de

maior diferença nos resultados quanto maior a resistência à compressão do concreto. Para valores de resistência à compressão até 30,0 MPa determinados em cilindros, a diferença em relação às peças pré-moldadas foi da ordem de 10%, enquanto que, para as resistências à compressão entre 40 e 60 MPa, a redução manteve-se na ordem de 30%.

Convém destacar que a comparação das peças pré-moldadas com os cilindros de relação altura/diâmetro igual a 1,0 ( $\varnothing 10 \times 10$  cm) tende a aumentar ainda mais a diferença entre os resultados, haja vista estes cilindros apresentarem maiores resistências em relação aos cilindros normalizados.

As peças pré-moldadas, de espessura 8,0 cm, ao serem ensaiadas à compressão demandam a utilização de placa auxiliar para a delimitação da área de carregamento. Esta placa deve possuir diâmetro 8,5 cm. Assim sendo, a relação espessura/diâmetro da placa auxiliar é de 0,94, valor próximo à relação altura/diâmetro do corpo de prova cilíndrico de dimensões  $\varnothing 10 \times 10$  cm. Desta forma, esperava-se que, *a priori*, os resultados de resistência à compressão destes corpos de prova fossem similares o que, de fato, não ocorreu. Portanto, o confinamento do cilindro teórico pelo próprio concreto que circunda a região carregada da peça pré-moldada exerce influência na capacidade de resistência do material, reduzindo a resistência à compressão. A justificativa para este comportamento não foi elucidada neste trabalho e, desta forma, há que se realizar outros trabalhos para confirmação deste fenômeno e para esclarecer a motivação para a redução da resistência à compressão.

## 5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos no presente estudo foi possível fazer as seguintes conclusões:

Os corpos de prova com relação altura/diâmetro ( $h/d$ ) iguais a 1,0 e 2,0 apresentaram diferentes resultados na resistência à compressão aos 28 dias, de tal forma que a redução da altura em relação ao diâmetro do corpo de prova aumenta a resistência à compressão do concreto. Portanto, a resistência à compressão não é uma característica intrínseca do material, pois depende da morfologia e das dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio.

As peças pré-moldadas para pavimentação simplesmente desempenadas após a moldagem apresentaram valores de resistência à compressão similares aos observados nas peças capeadas e retificadas. A principal divergência está na dispersão dos resultados, ou seja, a realização do ensaio na presença de superfície irregular tende a propiciar maior variabilidade dos resultados de resistência à compressão obtidos, o que é minimizado quando da realização de capeamento ou retificação.

O capeamento da superfície irregular das peças pré-moldadas com argamassa resultou em valores de resistência compressão similares aos obtidos nas peças retificadas, independentemente da relação água/cimento de amassamento. Assim sendo, o capeamento com argamassa apresenta viabilidade técnica no preparo das peças previamente à realização do ensaio de compressão.

A resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação foi inferior à dos corpos de prova cilíndricos com relação altura/diâmetro = 1,0 aos 28 dias. Essa redução na resistência à compressão acredita-se que seja atribuída a geometria das fôrmas nos corpos de prova, mas não foi encontrado na literatura informações que justifiquem esses resultados.

As resistências à compressão das peças pré-moldadas foram inferiores às obtidas nos corpos de prova cilíndricos. A diferença nos valores de resistência à compressão foi menor para baixos valores de resistência à compressão (menores que 25 MPa – determinação por meio de cilindro normalizado). Para valores superiores a 40,0 MPa, a redução na resistência à compressão foi da ordem de 30 ~ 35%.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são feitas as seguintes sugestões:

- Realizar o mesmo estudo deste trabalho, substituindo o corte do corpo de prova cilíndrico para obter a relação altura/diâmetro = 1,0, pela moldagem exata com essa relação.
- Na realização do ensaio à compressão utilizar os discos de aço ( $\varnothing$  8,48 cm), para romper os corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing$  10x10 cm).

## 7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 10.520: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação.** Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.780: Peças de concreto para pavimentação – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária.**  
1982.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio e Janeiro, 2009

\_\_\_\_\_. **NBR 12.655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – procedimento.** Rio e Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio e Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio e Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 5.739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio e Janeiro, 2007.

BAZANT, Z. P. **Size effect.** International Journal of Solids and Structures, v. 37 p. 69-80, sep. 2000.

Copel **pré-moldadas em concreto**, Google Analytics. Disponível em:< [tuboscopel.com.br/produto-view/pavimento-intertravado-paver/](http://tuboscopel.com.br/produto-view/pavimento-intertravado-paver/)>. Acesso em 4 de setembro de 2017.

COURA, C. V. G. **Estudo da influência da dimensão do agregado e do corpo-de-prova na resistência à compressão axial do concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niteroi, 2006.

COURA, C. B. D. **Análise da lei de literatura BAZANT e de Carpinteri na resistência à compressão do concreto**. 2008. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 8(1) 27.

FERNANDES, I. **Ensaio em blocos de concreto e pavimentos intertravados**. São Paulo: Votorantim, Célula Geração de Mercados, 2000.

HAMASSAKI, L. T., SANTOS, R. F. C. Corpos de prova. **Revista Notícias da Construção**, São Paulo, v. 28, jan. 2013.

HELENE, P. R. L., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1 ed., São Paulo: Pini, 1992.

Kim,Hong Eo, **Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks**, 1990, Korea Advanced Institut of Science and Technology.1990

ISLAM, M. M. **Interpretation of Concrete Strength for Nonstandard Specimens**. 2002. Journal of Materials in Civil Engineering / march/april 2002.

Manual Técnico de Piso Intertravado de concreto. **Manual Técnico de Piso Intertravado de concreto**. São Paulo: 2004, 54 p.

NEVILLE & BROOKS, **Tecnologia do concreto**. 2ªed. São Paulo: Boockman, 2013. 452p.

XAVIER, M. **Elementos de concreto contendo resíduos de construção e demolição (rcd) destinados à pavimentação**. 2017. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil – Universidade Federal do Oeste da Bahia. Barreiras, 2017.

YI, S., YANG, E. I., CHOI, J. C. **Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete**. Nuclear Engineering and Design, v. 236 p. 115–127, 2006.

## APÊNDICE

Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão para corpos de prova cilíndricos.

Tabela A. 1 – Corpo de prova cilíndrico ( $\varnothing$  10 x 20 cm)

Relação água/cimento	Identificação	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação
0,40	CP 01	56,9	56,4	1,7	3,0
	CP 02	59,5			
	CP 03	55,2			
	CP 04	56,1			
	CP 05	56,7			
	CP 06	54,1			
	CP 07	56,6			
0,50	CP 01	42,8	41,7	1,2	2,9
	CP 02	39,9			
	CP 03	41,1			
	CP 04	42,0			
	CP 05	42,7			
0,60	CP 01	26,2	27,2	0,7	2,6
	CP 02	26,8			
	CP 03	27,7			
	CP 04	27,7			
	CP 05	27,7			

Fonte: Própria.

Tabela A. 2 – Corpo de prova cilíndrico ( $\varnothing$  10 x 10cm).

Relação água/cimento	Identificação	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação
0,40	CP 01	64,2	60,6	3,3	5,4
	CP 02	59,7			
	CP 03	57,9			
0,50	CP 01	42,7	44,3	1,5	3,4
	CP 02	44,8			
	CP 03	44,5			
	CP 04	46,4			
	CP 05	43,0			
0,60	CP 01	30,0	29,3	0,8	2,6
	CP 02	28,6			
	CP 03	29,7			
	CP 04	28,4			
	CP 05	29,8			

Fonte: Própria.

Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão para peças pré-moldadas de concreto para pavimentação:

Tabela A. 3 – Peça pré-moldada de concreto desempenado

Relação água/cimento	Identificação	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação
0,40	CP 01	42,3	36,8	5,0	13,5
	CP 02	32,6			
	CP 03	35,4			
0,50	CP 01	25,5	28,3	2,4	8,7
	CP 02	29,5			
	CP 03	30,0			
0,60	CP 01	25,9	26,8	1,7	6,3
	CP 02	25,8			
	CP 03	28,8			

Fonte: Própria.

Tabela A. 4 – Peça pré-moldada de concreto com preparo superficial capeado.

Relação água/cimento	Identificação	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação
0,40	CP 01	40,54	38,61	2,24	5,79
	CP 02	38,70			
	CP 03	34,95			
	CP 04	40,30			
	CP 05	38,59			
0,50	CP 01	33,6	31,8	1,7	5,4
	CP 02	29,5			
	CP 03	31,8			
	CP 04	32,4			
0,60	CP 01	25,9	26,8	1,7	6,3
	CP 02	25,8			
	CP 03	28,8			

Fonte: Própria.

Tabela A. 5 – Peça pré-moldada de concreto retificado.

Relação água/cimento	Identificação	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação
0,40	CP 01	39,8	40,4	2,3	5,6
	CP 02	39,1			
	CP 03	37,6			
	CP 04	42,5			
	CP 05	43,0			
0,50	CP 01	31,6	29,2	1,9	6,5
	CP 02	27,1			
	CP 03	29,6			
	CP 04	28,5			
0,60	CP 01	25,4	23,7	1,5	6,3
	CP 02	23,4			
	CP 03	22,4			

Fonte: Própria.