

Determinação do fator de correlação quanto a resistência à compressão axial entre blocos de concreto e amostras extraídas dos blocos

Determination of concrete blocks to samples extracted from the block compressive strength correlation factor

Lívia Regueira Fortunato¹ , Guilherme Aris Parsekian¹ , Alex Neves Junior² 

¹Universidade Federal de São Carlos. Rod. Washington Luís, km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

²Universidade Federal de Mato Grosso. Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, 78060-900, Cuiabá, MT, Brasil.

e-mail: liviarfortunato@hotmail.com, parsekian@ufscar.br, alexnevesjr@gmail.com

RESUMO

O artigo traz resultados de análise de blocos produzidos em indústria por meio de máquina hidráulica vibro – prensa e de amostras extraídas do próprio bloco, logo com mesmo traço e processo de vibração/compactação. Os blocos e amostras foram submetidos à ensaios de resistência à compressão axial e os resultados foram correlacionados. Tal fato é inédito na literatura, pois empregou-se blocos fabricados em indústria e amostras cortadas do próprio bloco para as análises. Ao correlacionar os valores de resistência à compressão dos blocos BR4 e BR 16 e suas respectivas amostras aos 02, 07 e 28 dias; verificou-se que aos 02 dias a resistência da amostra é comparativamente maior que a resistência do bloco inteiro. Aos 28 dias a relação de resistência tende a diminuir, ficando em torno de 2,0. Traçando-se um paralelo com os blocos, acredita-se que esse comportamento é esperado, uma vez que a relação tração e compressão nas menores idades também é maior e se reduz com o passar dos dias, ficando na faixa de 2, devido a relação de área bruta e área líquida.

Palavras-chave: Bloco; amostra; resistência; correlação.

ABSTRACT

This article results from the analysis of blocks produced in industry using a hydraulic vibro-press machine and samples extracted from the block itself, therefore with the same trace and vibration/compaction process. The blocks and samples were subjected to axial compression resistance tests and the results were correlated. This fact is unprecedented in the literature, as blocks manufactured in industry and samples cut from the block itself were used for analysis. By correlating the compressive strength values of blocks BR4 and BR 16 and their respective samples at 02, 07 and 28 days; it was found that at 2 days the resistance of the sample is comparatively greater than the resistance of the entire block. After 28 days, the resistance ratio tends to decrease, remaining around 2.0. Drawing a parallel with the blocks, it is believed that this behavior is expected, since the traction and compression ratio at younger ages is also higher and reduces as the days go by, remaining in the range of 2, due to the ratio of gross area and net area.

Keywords: Masonry units; sample; resistance; correlation.

1. INTRODUÇÃO

O processo de extração e fabricação das matérias primas necessárias para a obtenção do concreto emite grandes quantidades de CO₂ ao meio ambiente. Pesquisas recentes têm mostrado que materiais à base de cimento Portland possuem a capacidade de incorporar CO₂ em forma de CaCO₃, através do processo de carbonatação acelerada. A referida cura, além da captura permanente de CO₂ nos poros do concreto, promove ganho de resistência mecânica logo nas primeiras idades [1–8].

Essa tecnologia pode ser aplicada em elementos estruturais sem reforço de aço, como é o caso dos blocos e guias de concreto, peças de concreto para pavimentação, entre outros. Neste estudo, optou-se por trabalhar com blocos de concreto, pois sua produção e uso no mercado é em larga escala, é composto por concreto

seco, apresenta paredes estreitas e geometria vazada, fatores que combinados permitem uma maior difusividade do CO₂ no interior da peça e um amplificado alcance da frente de carbonatação, além de apresentar crescente utilização nos médios e grandes centros urbanos.

Neste contexto desenvolve-se esta pesquisa, que procura determinar melhores parâmetros para cura por carbonatação de blocos de concreto. A cura com CO₂ será realizada em câmara de carbonatação fabricada e desenvolvida pelos pesquisadores [9]. Para facilitar o estudo de cura por carbonatação, trabalhar-se-á com amostras extraídas dos blocos. Para tanto, inicialmente, para verificar o ganho de resistência promovido pela referida cura, correlacionou-se a resistência da amostra e do bloco.

Neste artigo serão abordados os resultados da pesquisa referentes à resistência mecânica dos blocos e suas amostras que serão empregados para extrapolação antes e após a carbonatação. Através do estado da arte não se observou a utilização de amostras extraídas (cortadas) de blocos produzidos industrialmente, ademais verificou-se que poucos foram os estudos que empregaram blocos de concreto vibro-prensados, além de grande variabilidade quanto aos formatos, compactação e tipo de concreto empregado (seco ou plástico) tanto na confecção das amostras como dos blocos, gerando importantes variações nos resultados obtidos. Correlacionar amostras e blocos permitirá viabilizar e otimizar as análises, ao empregar amostras de tamanho reduzido que possam representar as condições dos blocos nas suas dimensões regulares.

O presente estudo tem por objetivo determinar o fator de correlação quanto a resistência à compressão axial entre blocos de concreto e amostras extraídas dos blocos. Para tanto, trabalhou-se com blocos de concreto com função estrutural produzidos pela indústria parceira da pesquisa e amostras extraídas dos blocos com auxílio de serra de corte. O programa experimental foi dividido em três estágios. O Estágio 1, referiu-se à etapa de definição dos traços e processos de cura, bem como a realização de ensaios de resistência à compressão axial dos blocos de concreto com função estrutural de 4MPa e 16MPa aos 02, 07 e 28 dias. No Estágio 2 foi determinado o dispositivo de corte, tipo de capeamento, local ideal em que as amostras seriam extraídas dos blocos e, por fim, as amostras dos blocos com 4 e 16 MPa foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias. No Estágio 3, foi determinada a correlação quanto a resistência à compressão axial dos blocos e amostras com 4 e 16 MPa, aos 02, 07 e 28 dias. Optou-se por trabalhar com blocos com as referidas resistências, por estas apresentarem menor variação estatística, viabilizar a etapa dos ensaios termogravimétricos e por tornar possível a verificação do comportamento quanto a absorção de CO₂ para os extremos (menor e maior resistência). Através dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial foi possível obter o fator de correlação entre as amostras e blocos de concreto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Estudos sobre correlação da resistência à compressão axial entre blocos e amostras

BECICA e HARRIS [10] analisaram experimentalmente blocos vazados de concreto produzidos em laboratório com dimensão nominal de 190 × 190 × 390 mm e relação área líquida/área bruta de 0,54. Dez corpos-de-prova (CP) foram extraídos dos blocos com relação altura/comprimento variando entre 1:1 e 2:1 mantendo-se a espessura e geometria com a mesma inclinação observada nas paredes dos blocos. Os pesquisadores obtiveram relação CP/Bloco para resistência à compressão média dos corpos de prova na área líquida igual a 1,22.

FRASSON JÚNIOR [11], estudou blocos com dimensão 140 × 190 × 390 mm, com três diferentes resistências nominais (6 MPa, 9 MPa e 12 MPa) e geometrias distintas, com paredes finas e paredes grossas, objetivando avaliar o efeito da geometria na relação de resistência entre CP e bloco. Para cada uma das séries de blocos foram produzidos 4 corpos de prova cilíndricos (50 × 100 mm). Os blocos foram fabricados em máquina vibro-prensa, já os corpos de prova foram produzidos com o mesmo traço dos blocos, porém compactados com soquete (o mesmo utilizado em ensaios com argamassa). Posteriormente, blocos e CPs foram submetidos à cura térmica à vapor. FRASSON JÚNIOR [11] obteve relação CP/Bloco para resistência à compressão média de aproximadamente 0,80. Tal resultado mostrou-se constante para todas as séries e para blocos de diferentes geometrias (parede fina e grossa), considerando-se a área líquida.

PRUDÊNCIO JÚNIOR [12] afirma que a resistência do bloco, mesmo em área líquida, depende da espessura de suas paredes e também da conicidade dos furos. Portanto, a relação encontrada no trabalho de FRASSON JÚNIOR [11] não é absoluta e deve ser pesquisada caso a caso.

MARZAHN [13] realizou ensaio de resistência à compressão axial em blocos maciços de concreto autoclavados (constituídos a partir de uma reação química entre cal, cimento, areia e pó de alumínio), dimensão de 200 × 240 × 500 mm, com ar incorporado e massas específicas diferentes; e em corpos de prova cilíndricos (100 × 200 mm) extraídos dos blocos. O autor obteve relação CP/Bloco para resistência à compressão média de 86% e 95% para as diferentes massas específicas.

BARBOSA e HANAI [14], compararam a resistência à compressão axial de blocos vazados de concreto com dimensões $140 \times 190 \times 390$ mm e área líquida de aproximadamente $306,63 \text{ cm}^2$. A produção dos blocos foi realizada em laboratório utilizando-se forma metálica, concreto plástico e não houve vibro-prensagem. Os corpos-de-prova cilíndricos (100×200 mm) foram produzidos com os mesmos concretos dos blocos, cuja resistência nominal era de 10MPa, 20MPa e 30MPa. A relação CP/Bloco para resistência à compressão média foi de 1,05; 0,83 e 0,91; respectivamente. Os autores observaram que para a maioria dos concretos (20MPa e 30 MPa) a resistência à compressão obtida para os blocos é maior que para os corpos de prova. Os autores acreditam que tal motivo se deve ao fato de que os corpos-de-prova apresentam relação entre altura e maior dimensão transversal (h/t) igual a 2, enquanto que os blocos possuem $h/t \sim 0,5$. Assim, em decorrência das diferentes geometrias e das condições de confinamento no topo e na base, não ocorre uma distribuição de tensões ao longo da altura do bloco tão uniforme quanto a que ocorre nos corpos de prova e, como consequência, os blocos apresentam maior capacidade resistente. A atuação do confinamento no bloco também é dependente de sua configuração geométrica (espessura das paredes e índice de vazios).

BUTTLER [15] trabalhou com blocos vazados de concreto estrutural $140 \times 190 \times 390$ mm e corpos-de-prova cilíndricos 50×100 mm. Ambos foram produzidos utilizando-se concreto seco com agregados reciclados. Os CPs não foram vibro-prensados, mas adensados no laboratório da indústria com uma energia de adensamento igual a 15 golpes de soquete para cada quatro camadas de preenchimento, após a moldagem os CPs foram submetidos à cura térmica conjuntamente com os blocos da sua série. A correlação entre a resistência à compressão dos corpos de prova e blocos de concreto, considerando-se as resistências nominais dos blocos de 4,5 MPa, 6,0 MPa e 8,0 MPa, a relação entre a resistência dos corpos-de-prova e dos blocos de concreto, levando-se em conta a área líquida, foi de 0,98, 0,88 e 0,73, respectivamente. O autor cita que assegurar a uniformização da energia de adensamento dos CPs é uma dificuldade, já que depende do operador de moldagem. Assim, para o emprego dessa metodologia, BUTTLER [15] propõe como solução a adaptação de um dispositivo mecânico que uniformize a energia de adensamento por meio da queda livre de uma massa a partir de uma determinada altura.

Resumindo, BECICA e HARRIS [10] e GANZERLI *et al.* [16], observaram que a resistência dos corpos de prova é em torno de 22% maior que a resistência dos blocos, já FRASSON JÚNIOR [11] verificou resistências de corpo de prova aproximadamente 20% menores que as resistências dos blocos. MARZAHN [13] concluiu que a resistência da amostra variou entre 86% a 95% da resistência do bloco. PRUDÊNCIO JÚNIOR [12] cita ainda que como a resistência do bloco, mesmo em área líquida, depende fundamentalmente da espessura de suas paredes e também da conicidade dos furos, a relação encontrada no trabalho de FRASSON JÚNIOR [11] não é absoluta e deve ser pesquisada caso a caso. Para BARBOSA e HANAI [17, 18], o avanço em busca de outras correlações deve vir acompanhado da definição de um corpo de prova que melhor represente o comportamento do bloco quando submetido aos ensaios de compressão. Para BUTTLER [16] para o processo de adensamento dos CPs, é essencial pleno domínio da técnica a fim de se obter uma energia próxima da qual estão submetidos os blocos na vibro-prensagem.

Através das pesquisas apresentadas foi possível observar que os trabalhos que visaram caracterizar as propriedades mecânicas dos blocos de concreto se depararam com a dificuldade referente ao processo de fabricação do mesmo, uma vez que esta envolve a vibro-prensagem do concreto seco. Sendo assim, muitas pesquisas produziram o bloco em laboratório com concreto plástico, utilizando-se formas, sem vibro-prensagem. Em nenhum dos estudos a amostra foi retirada diretamente do bloco fabricado por vibro-prensagem, a maioria apresentou formato cilíndrico e algumas foram compactadas com soquete. De fato, as pesquisas sobre o referido tema são escassas e os resultados encontrados são bastante divergentes, para tanto verifica-se a necessidade de uma maior padronização quanto aos corpos de prova, uma vez que as diferentes geometrias empregadas exercem influência significativa nos resultados, bem como os processos por moldagem ou extração.

3. MÉTODO

3.1. Ensaios estruturais

Durante o programa experimental trabalhou-se com blocos de concreto com função estrutural produzidos pela indústria parceira da pesquisa e amostras extraídas dos blocos com auxílio de serra de corte. A referida etapa tem como objetivo determinar a correlação entre a resistência à compressão axial dos blocos e amostras. Para tanto, foi subdividida em 3 estágios. Assim sendo, o Estágio 1, refere-se a etapa de definição dos traços e processos de cura, bem como da realização de ensaios de resistência à compressão axial dos blocos de concreto com função estrutural de 4MPa e 16MPa aos 02, 07 e 28 dias. No Estágio 2 foi determinado o dispositivo de corte, tipo de capeamento, local ideal em que as amostras seriam extraídas dos blocos e, por fim, as amostras dos blocos com 4 e 16 MPa foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias. No Estágio 3,

foi determinada a correlação quanto a resistência à compressão axial dos blocos e amostras com 4 e 16 MPa, aos 02, 07 e 28 dias. Optou-se por trabalhar com blocos com as referidas resistências, por estas apresentarem menor variação estatística, viabilizar a etapa dos ensaios termogravimétricos e por tornar possível a verificação do comportamento quanto a absorção de CO₂ para os extremos (menor e maior resistência). Quanto a idade, optou-se por trabalhar com 02 dias, pelo fato de que a pesquisa analisa os efeitos da cura por carbonatação acelerada no concreto e é sabido que esta promove elevado ganho de resistência logo nas primeiras idades; sendo assim, este é tempo mínimo ideal e necessário para analisarmos o comportamento estrutural do concreto devido a cura com CO₂, já que com essa idade torna-se possível a realização dos ensaios. As idades de 07 e 28 dias, foram escolhidas por serem padrão de controle de materiais. A Figura 1, demonstra o fluxograma referente aos estágios citados.

3.1.1. Estágio 1

- Blocos de concreto

Os blocos de concreto utilizados na pesquisa foram produzidos por meio de máquina vibroprensa com dimensão nominal de 140 × 190 × 390 mm. Na Figura 2 é possível observar o bloco objeto de estudo da pesquisa. Os materiais e processos de fabricação foram os mesmos empregados no dia a dia da fábrica e são descritos a seguir.

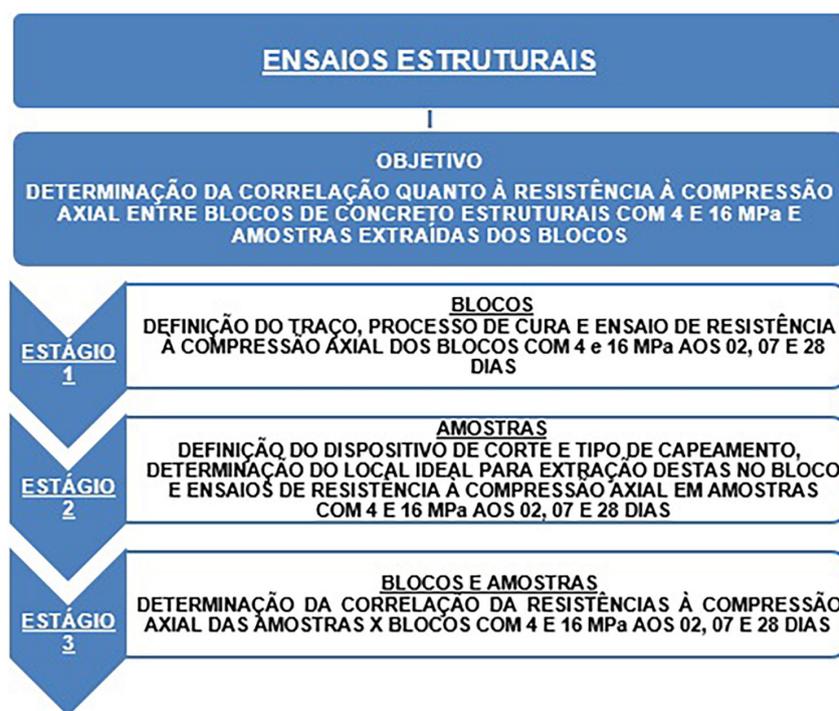


Figura 1: Fluxograma referente ao programa experimental. Fonte: Autor (2020).



Figura 2: Bloco de concreto empregado na pesquisa. Fonte: Autor (2022).

- Aglomerante – Cimento Portland

O Cimento Portland utilizado pela fábrica para produção dos blocos de concreto é o do tipo V de Alta Resistência Inicial (CPV – ARI) ensacado, com 40 Kg.

- Agregados naturais

- a) Areia natural

A areia natural utilizada na pesquisa é de origem quartzosa, oriunda do Porto de Areia Marimbondo situado à margem direita do Rio Grande no município de Fronteira – MG. Esta areia, classificada como agregado miúdo, foi utilizada na produção dos blocos. Amostras da referida areia foram coletadas para caracterização no Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da UFSCar e as propriedades foram elencadas na Tabela 1 a seguir.

- b) Pó de pedra

O pó de pedra, como é popularmente conhecido, é uma areia industrial originária do processo de britagem de rocha basáltica. O material foi adquirido na Pedreira Constroeste, localizada à margem esquerda do Rio Grande no município de Icém – SP. Esse material também é utilizado na produção diária da fábrica e foi empregado na fabricação dos blocos. O pó de pedra também é classificado como agregado miúdo. Amostras do referido agregado foram coletadas para caracterização no Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da UFSCar e as propriedades foram elencadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 1: Propriedades do agregado natural – areia média. Fonte: Adaptado de Benitez [19].

PROPRIEDADE AVALIADA		AREIA MÉDIA
Teor de umidade total (%)		3,90
Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	1480,18
	Estado compactado	1576,61
Volume de vazios (%)	Estado solto	42,18
	Estado compactado	38,41
Absorção de água (%)		6,03
Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)		2,62
Massa específica na condição SSS (g/cm ³)		2,64
Massa específica absoluta (g/cm ³)		2,66
Teor de material pulverulento (%)		0,11

Tabela 2: Propriedades do agregado natural – pó de pedra. Fonte: Adaptado de BENITTEZ [19].

PROPRIEDADE AVALIADA		PÓ DE PEDRA
Teor de umidade total (%)		2,11
Estado solto	1809,41	
Estado compactado	1960,57	
Estado solto	29,46	
Estado compactado	23,56	
Absorção de água (%)		4,17
Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)		2,65
Massa específica na condição SSS (g/cm ³)		2,77
Massa específica absoluta (g/cm ³)		3,01
Teor de material pulverulento (%)		21,25

c) Pedrisco

O agregado graúdo utilizado tanto na pesquisa quanto no dia a dia da fábrica é o pedrisco de dimensão máxima ($D_{máx}$) igual a 6,3 mm, de origem basáltica. Esse material foi adquirido na Pedreira Constroeste de Icém – SP. Amostras do referido agregado foram coletadas para caracterização no Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da UFSCar e as propriedades foram elencadas na Tabela 3 a seguir.

A Figura 3, a seguir, demonstra os agregados empregados na produção dos blocos.

• Aditivo

O aditivo plastificante empregado na produção de artefatos pela fábrica é o ADB-PLASTICIZER PREMIUM. O consumo empregado na pesquisa foi descrito na Tabela 4.

• Traços

São empregados blocos de concreto com função estrutural por estes apresentarem não apenas função de vedação, mas também de estrutura, sendo empregados em obras de alvenaria estrutural. E quanto a resistência, a princípio, optou-se por empregar blocos com 4, 8 e 16 MPa, por serem comumente solicitadas nas obras

Tabela 3: Propriedades do agregado natural – pedrisco. Fonte: Adaptado de BENITTEZ [19].

PROPRIEDADE AVALIADA		PEDRISCO
Teor de umidade total (%)		0,91
Estado solto	1618,14	
Estado compactado	1687,24	
Estado solto	47,29	
Estado compactado	45,04	
Absorção de água (%)		1,70
Massa específica aparente no estado seco (g/cm^3)		3,02
Massa específica na condição SSS (g/cm^3)		2,92
Massa específica absoluta (g/cm^3)		2,87
Teor de material pulverulento (%)		–

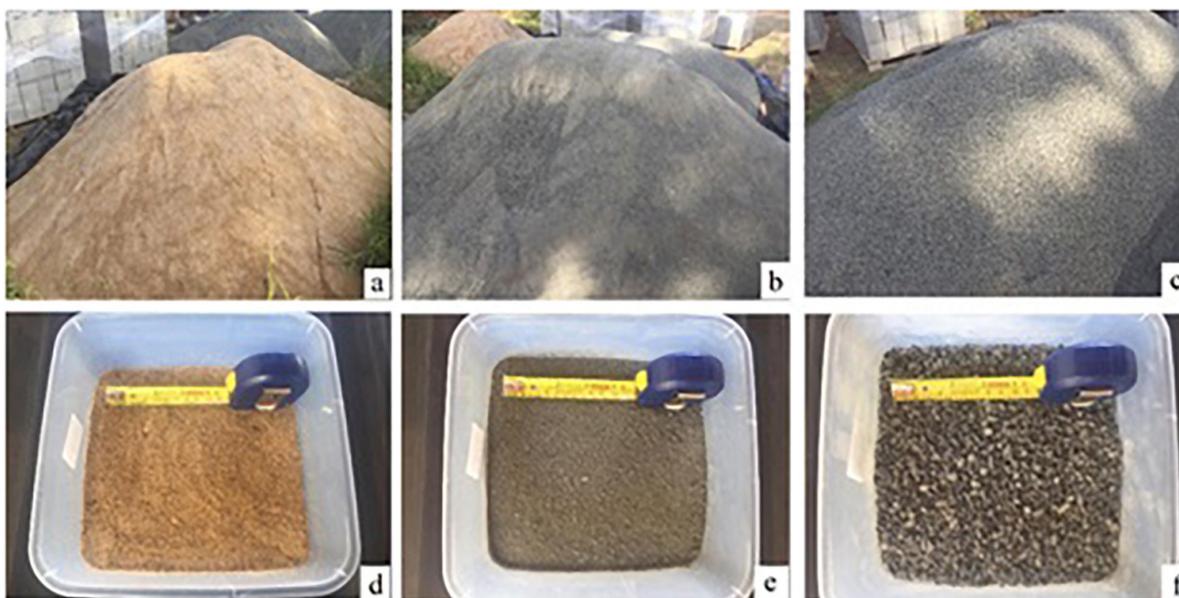


Figura 3: Agregados naturais. a) Areia natural; b) Pó de pedra; c) Pedrisco; d) Detalhe areia; e) Detalhe pó de pedra; f) Detalhe pedrisco. Fonte: Autor (2020).

e também para analisar a relação entre resistência do bloco e absorção de CO₂, já que com o aumento da resistência, há uma tendência a diminuição da difusão de CO₂ no interior da peça. No entanto, para estabelecimento dos coeficientes de correlação, foram escolhidos os traços que apresentaram os menores coeficientes de variação visando-se a padronização dos resultados. Para tanto, produziu-se blocos de concreto com função estrutural, 4, 8 e 16 MPa, com os traços convencionalmente utilizados pela empresa parceira da pesquisa; e blocos com os traços sugeridos pela Associação Bloco Brasil (após a análise dos insumos e dos equipamentos empregados pela indústria parceira). Após a fabricação, os blocos foram submetidos à ensaios de resistência à compressão axial e os resultados foram analisados estatisticamente, por meio da análise de variância ANOVA e Teste de Tukey. A nomenclatura utilizada para cada bloco foi a seguinte:

- Bloco Indústria 4 MPa – C 4
- Bloco Indústria 8 MPa – C 8
- Bloco Indústria 16 MPa – C 16
- Bloco Associação Bloco Brasil 4 MPa – BR 4
- Bloco Associação Bloco Brasil 8 MPa – BR 8
- Bloco Associação Bloco Brasil 16 MPa – BR 16

A Tabela 4, contém os traços unitários, em massa, dos blocos de concreto estudados.

• Fabricação do bloco

Na indústria, os agregados naturais (pedrisco, areia e pó de pedra) eram armazenados em baias separadas, conforme demonstrado na Figura 4) a); o cimento Portland (CP V ARI – ensacado (40kg)) era armazenado em paletes conforme Figura 4) b); a água utilizada no amassamento foi controlada através de um hidrômetro digital, com precisão de 0,005 e aferida em litros. A Figura 4) c) demonstra os controles de água e aditivo.

Tabela 4: Traços para fabricação dos blocos de concreto. Fonte: Autor (2022).

TRAÇO	CIMENTO (kg)	ADITIVO (L)	PEDRISCO (kg)	AREIA NATURAL (kg)	PÓ DE PEDRA (kg)	RELAÇÃO A/C
C 4	1	0,100	4,85	5,92	9,05	0,733
C 8	1	0,175	2,77	3,38	5,17	0,523
C 16	1	0,325	1,49	1,82	2,78	0,313
BR 4	1	0,075	6,47	6,97	3,62	0,733
BR 8	1	0,100	4,85	5,23	2,71	0,523
BR 16	1	0,200	2,43	2,61	1,36	0,313



Figura 4: Matérias – primas: a) baia de agregados naturais, b) cimento ensacado, c) dispositivos de controle de água e aditivo. Fonte: Autor (2022).

Os agregados, aglomerante, aditivo e água, foram homogeneizados em misturador (Figura 5 a)), transportados em esteira (Figura 5 b)) até a máquina vibroprensa hidráulica (Figura 5 c)) onde realizou-se a moldagem, compactação e extrusão dos blocos.

Após a extrusão, os blocos foram transportados, armazenados no barracão coberto da indústria (Figura 6 a)) e submetidos à cura por 12 horas em lona plástica (Figura 6 b)). Após a cura, os blocos foram armazenados em paletes em sala isolada (com janelas e portas fechadas) e umidificada até as idades de 02, 07 e 28 dias.

- Resistência à compressão axial

Para os ensaios de resistência à compressão axial os blocos não apresentaram quebras, trincas, deformações ou irregularidade de arestas. Utilizou-se para os ensaios uma máquina universal de ensaios modelo EMIC DL60000 e uma máquina de ensaio a compressão modelo EMIC PC200 que atendia aos requisitos da ISO 7500-1 (2018). Quanto ao preparo dos corpos de prova não foi possível realizar o capeamento ou retífica conforme preconização da ABNT NBR 12118:2013 [20], pois os blocos foram ensaiados aos 02 dias de idade. Para tanto, utilizou-se o capeamento com o material chapa dura (Duratex). FORTES *et al.* [21] e FORTES [22], verificaram em seus estudos que para as resistências nominais dos blocos analisados, não há diferença significativa entre as médias de resistência à compressão entre blocos de concreto capeados com chapa dura e blocos de concreto capeados com pasta de cimento. Assim sendo, empregou-se o capeamento com chapa dura para os ensaios de resistência à compressão axial dos blocos aos 02, 07 e 28 dias, visando-se padronizar o procedimento. A Figura 7 mostra o material de capeamento seco utilizado e o bloco capeado na prensa antes do ensaio.

- Definição dos traços

Após a fabricação, 36 blocos, sendo 06 de cada traço (C4, C8, C16, BR4, BR8 e BR16) foram submetidos à ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias e os resultados foram analisados estatisticamente. Nessa



Figura 5: Equipamentos empregados na fabricação dos blocos: a) misturador, b) esteira, c) máquina vibroprensa. Fonte: Autor (2022).



Figura 6: Blocos de concreto: a) distribuídos no barracão, b) cobertos com lona, c) armazenados em sala isolada. Fonte: Autor (2022).

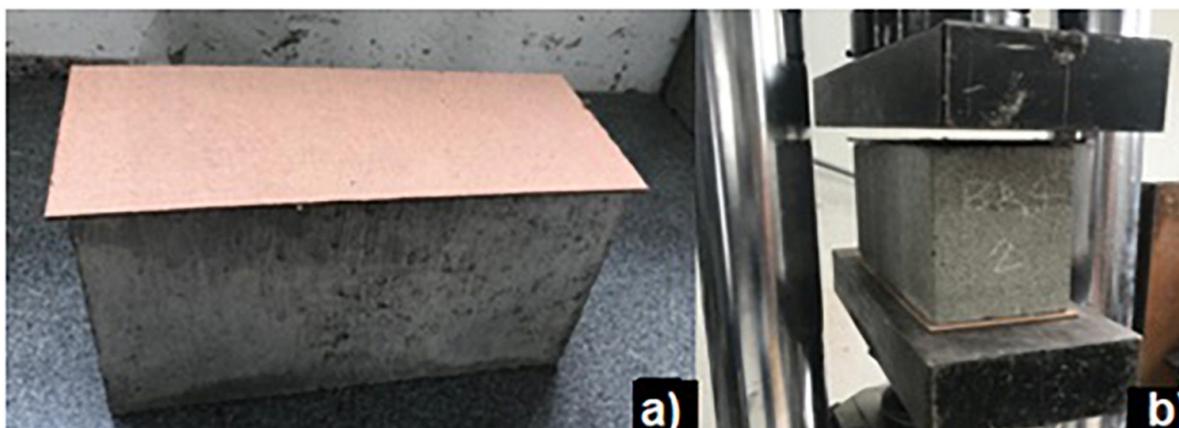


Figura 7: Capeamento do bloco: a) chapa dura sobre o bloco; b) Bloco posicionado na prensa hidráulica capeado na face inferior e superior com chapa dura. Fonte: Autor (2022).

Tabela 5: Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para todos os blocos analisados.

N = 4	BR4	C4	BR8	C8	BR16	C16
1	6,65	4,51	7,31	7,21	15,81	11,71
2	6,88	4,52	7,33	7,46	16,52	12,22
3	6,91	4,71	7,92	8,19	16,75	14,64
4	7,27	5,26	7,97	8,49	19,49	16,46
fbm	6,93	4,75	7,6	7,84	17,14	13,76
Desvio padrão (DV)	0,22	0,31	0,31	0,52	1,4	1,91
Coef. Variação (CV)	3,20%	6,42%	4,10%	6,65%	8,16%	13,91%

fase inicial a variação verificada foi grande (10,34% a 25,60%), pois os procedimentos de ensaios estavam sendo refinados – conforme será comentado na sequência desse artigo. Para tanto, optou-se por eliminar o maior e menor resultado nessa análise preliminar, trabalhando-se com 04 CPs, dessa maneira o coeficiente de variação reduziu-se, variando entre 3,20% e 13,91%. Nesta configuração, os traços que apresentaram menor variação foram BR 4, coeficiente de variação de 3,20%; BR 8, coeficiente de variação de 4,10% e BR 16, coeficiente de variação de 8,16%. Acreditou-se que a referida variação se deu pelo emprego do processo de cura em que após a produção os blocos foram cobertos durante 12 horas com lona plástica e armazenados em barracão coberto e ventilado até completar a idade de 28 dias. Conforme demonstra a Tabela 5 a seguir.

Para viabilizar a etapa de ensaios deste programa experimental optou-se por trabalhar com dois traços, uma vez que a pesquisa depende diretamente da empresa para confeccionar os blocos, através do fornecimento de matérias primas, estrutura, maquinários, pessoal, logística e tempo. Assim sendo, definiu-se pelo emprego dos blocos com 4MPa (traço BR 4) e 16MPa (traço BR 16). Ao trabalhar com os referidos traços torna-se possível verificar a correlação entre a resistência à compressão e a capacidade de absorção de CO₂ para as menores e maiores resistências.

Visando-se verificar se a variação entre as unidades de alvenaria se deu pelo processo de cura e estocagem, realizou-se a fabricação dos blocos com 4 MPa (BR 4), variando-se o procedimento de cura. Dessa maneira, seis blocos foram curados pelo processo tradicional da empresa com lona plástica durante 12 horas em barracão coberto e posterior armazenamento em sala isolada (porta e janela fechadas) e umidificada; e seis blocos foram transportados imediatamente após a produção para sala isolada, onde foram cobertos com lona plástica durante 12 horas e posteriormente armazenados sem lona até completar 02 dias. Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial foram apresentados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 02 dias considerando 06 unidades de blocos BR4, submetidos a diferentes processos de cura.

CORPO DE PROVA n°	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	
	BR4 – CURADOS LONA PLÁSTICA BARRACÃO + SALA FECHADA	BR4 – CURADOS LONA PLÁSTICA EM SALA FECHADA
f_{bm} (n = 6)	7,50	7,2
Desvio padrão (DP)	0,45	0,7
Coef. Variação (CV)	6,06%	9,77%

As análises apresentadas foram feitas considerando-se seis corpos de prova. Contudo, foi possível observar que o processo de cura que apresentou menor variação foi aquele em que os blocos após a fabricação foram cobertos com lona plástica durante 12 horas no próprio barracão em que foram produzidos e posteriormente armazenados em sala isolada e umidificada. Logo, optou-se por empregar o procedimento de cura que promoveu menor variação de resistência aos blocos.

Posteriormente, os traços BR 4 e BR 16, foram submetidos novamente aos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias e os resultados foram apresentados no próximo tópico desse trabalho.

3.1.2. Estágio 2

- Amostras dos blocos de concreto

Amostras de dimensões nominais de 50 × 50 mm foram extraídas, com auxílio de serra de corte, das paredes longitudinais dos blocos de concreto com função estrutural de 4MPa e 16MPa, e tamanho nominal de 140 × 190 × 390 mm, todos produzidos pela empresa fabricante parceira da pesquisa. As amostras estudadas foram confeccionadas com o mesmo traço, processo produtivo e energia de compactação dos blocos. A dimensão da amostra foi pensada para viabilizar a etapa de cura com CO₂ em câmara de carbonatação projetada e construída para esta pesquisa. A Figura 8 demonstra a amostra utilizada nesta pesquisa.

A utilização das amostras tornou viável o programa experimental da pesquisa, uma vez que devido à elevada quantidade de combinações de ensaios e à dimensão da câmara de carbonatação, ficaria inviável trabalhar apenas com blocos.

Em razão da parede interna do bloco de concreto ser prismática de comprimento variável, sua espessura varia ao longo da altura, tal fato é demonstrado na Figura 9.

Contudo, visando-se obter a resistência à compressão da amostra que mais se assemelha a do bloco, decidiu-se extrair amostras da região superior, intermediária (meio) e inferior da parede longitudinal do bloco. Portanto, foram extraídas 06 amostras da região superior, 06 amostras da região intermediária e 06 amostras da região inferior das paredes longitudinais dos blocos com função estrutural de 4MPa e 16MPa aos 02, 07 e 28 dias. O intuito foi determinar a resistência compressão axial das amostras e correlacionar com a resistência à compressão axial dos blocos. A Figura 10, demonstra as amostras e o locais em que foram retiradas.

- Resistência à compressão axial

Conforme informado as amostras foram confeccionadas com o mesmo traço, processo produtivo e energia de compactação dos blocos, e foram extraídas dos mesmos com auxílio de serra corte. Por se tratar de um corpo de prova extraído do bloco de concreto seguiremos as recomendações da ABNT NBR 5739:2018 [23] para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial.

À prensa utilizada acoplou-se uma célula de carga com capacidade de 600 KN, e as amostras com 4 e 16MPa, todas foram carregadas a uma velocidade de carregamento de 0,5625 kN/s.

Os corpos de prova (amostras) foram submetidos ao corte com serra circular manual e serra circular de bancada capeados utilizando-se chapa dura, conforme demonstra Figura 11, a seguir.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial das amostras BR 4 foram demonstrados na Tabela 7 a seguir.

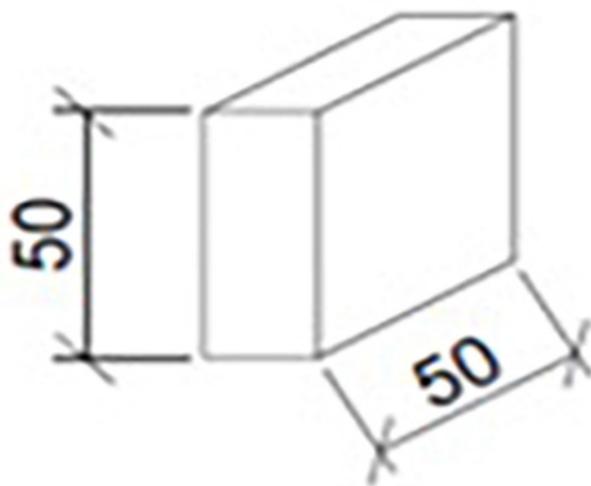


Figura 8: Amostras extraídas das paredes longitudinais dos blocos. Fonte: Autor (2022).

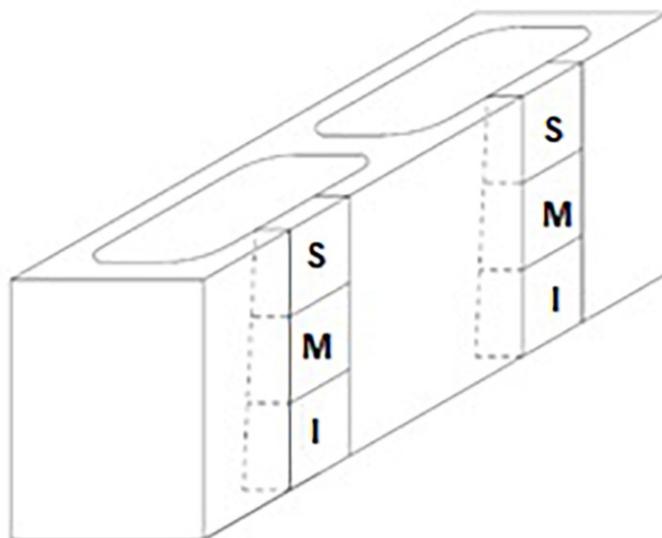


Figura 9: Posição em que amostras serão retiradas do bloco: a) superior (s), b) intermediária (m), e c) inferior (i). Fonte: Autor (2020).



Figura 10: Amostras: a) Local no bloco em que as amostras foram retiradas, b) Amostras extraídas das regiões inferior (i), intermediária (m) e superior (s) da parede longitudinal do bloco. Fonte: Autor (2022).

Com base nos resultados apresentados de resistências das amostras, realizou-se o teste estatístico ANOVA comparando-se as resistências de cada região (superior, intermediária e inferior) com os diferentes dispositivos de corte (serra circular manual e serra circular de bancada), os resultados foram:

- Superior: há variância ($F = 5,838268 > F \text{ crítico} = 4,964603$)
- Intermediária: não há variância ($F = 4,447996 < F \text{ crítico} = 4,964603$)
- Inferior: não há variância ($F = 1,221345 < F \text{ crítico} = 4,964603$)

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial das amostras BR 16 foram demonstrados na Tabela 8 a seguir.

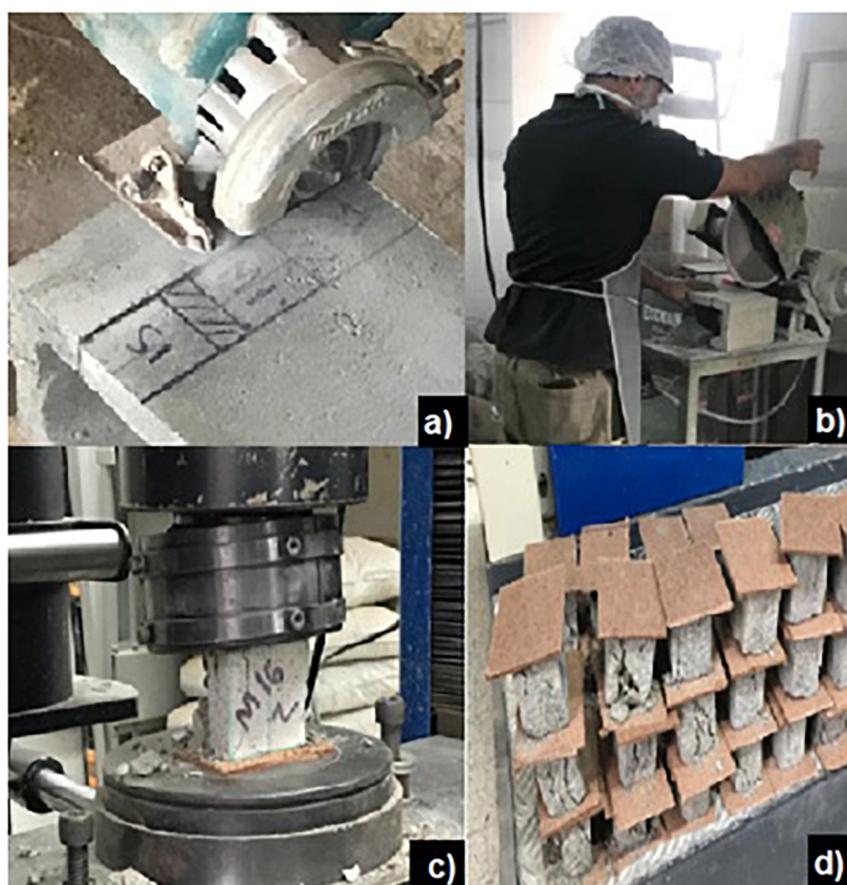


Figura 11: Amostras: a) extração da amostra com serra circular manual; b) extração da amostra com serra circular de bancada; c) amostra capeada com chapa dura na prensa, d) amostras capeadas com chapa dura após ensaio. Fonte: Autor (2022).

Tabela 7: Resistência à compressão axial das amostras BR 4.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) – AMOSTRAS BR 4						
CORPO DE PROVA n°	SERRA CIRCULAR MANUAL + CHAPA DURA (02 DIAS)			SERRA CIRCULAR DE BANCADA + CHAPA DURA (07 DIAS)		
	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR
Média (Mpa) (n = 6)	11,15	7,76	14,13	15,52	10,02	11,49
Desvio padrão	2,00	0,70	4,49	3,52	2,28	2,88
Coef. Variação (CV)	17,96%	9,00%	31,80%	22,65%	22,81%	25,11%

Com base nos resultados apresentados de resistências das amostras, realizou-se o teste estatístico ANOVA comparando-se as resistências de cada região (superior, intermediária e inferior) com os diferentes dispositivos de corte (serra circular manual e serra circular de bancada), os resultados foram:

- Superior: não há variância ($F = 0,021528 < F \text{ crítico} = 4,964603$)
- Intermediária: há variância ($F = 5,890204 > F \text{ crítico} = 4,964603$)
- Inferior: não há variância ($F = 60,50734 < F \text{ crítico} = 4,964603$)

Portanto, com base nos resultados apresentados, conclui-se que para as amostras BR 4 e BR 16 tanto o corte com serra circular manual como serra circular de bancada são viáveis de serem realizados. Porém, pela facilidade da utilização na prática, optou-se por empregar para todas as amostras serra circular manual.

O local ideal para extração das amostras (superior, intermediária e inferior) ainda não foi possível definir devido a elevada variação observada nos valores de resistência à compressão axial apresentados tanto para as amostras extraídas com serra circular manual como com serra circular de bancada, ambas capeadas com chapa dura. Acredita-se que a chapa dura não foi capaz de regularizar as faces, não absorvendo as imperfeições, acarretando assim, elevada variação. A Figura 12 a seguir demonstra irregularidade verificada em amostra.

Tabela 8: Resistência à compressão axial das amostras BR 16.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) – AMOSTRAS BR 16						
CORPO DE PROVA n°	SERRA CIRCULAR MANUAL + CHAPA DURA (02 DIAS)			SERRA CIRCULAR DE BANCADA + CHAPA DURA (07 DIAS)		
	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR
Média (n = 6)	43,40	21,51	28,45	44,20	30,56	11,49
Desvio padrão	8,96	5,23	3,93	8,31	6,5	2,88
Coef. Variação (CV)	20,64%	24,32%	13,81%	18,79%	21,26%	25,00%

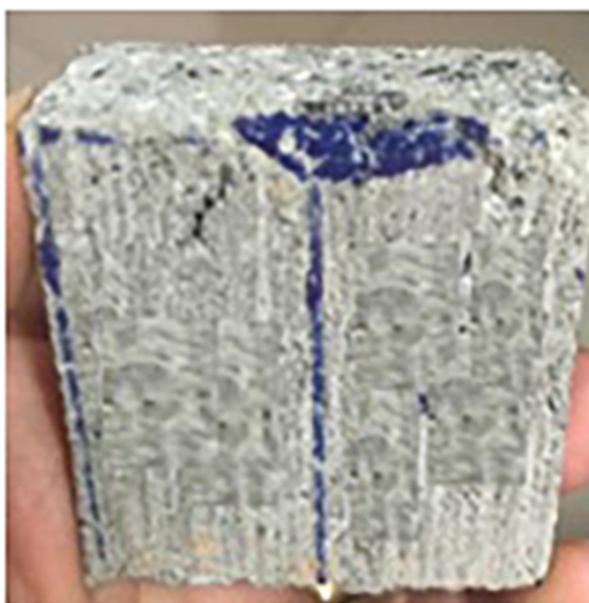


Figura 12: Amostra com partes desagregadas devido ao corte com serra circular manual e serra circular de bancada. Fonte: Autor (2022).

Visando-se reduzir a variação, propôs-se realizar os ensaios de resistência à compressão axial das amostras empregando-se capeamento com pasta de cimento com o intuito de preencher os vazios e corrigir imperfeições (Figura 13). Os resultados foram apresentados na Tabela 9.

Através da análise da Tabela 9 verificou-se que o capeamento com pasta de cimento proporcionou menor variação de que o capeamento com chapa dura tanto para as amostras BR 4 como BR 16. Acredita-se que o capeamento com pasta de cimento reduziu as irregularidades diminuindo a variação. Portanto, este foi o método adotado para capeamento das amostras.

Com o objetivo de verificar se houve variação entre as posições em que as amostras foram extraídas (superior, intermediária e inferior) realizou-se o teste estatístico ANOVA tanto para os blocos BR 4 como BR 16. Os resultados encontram-se nas Tabela 10 e 11, a seguir.

Verificou-se que tanto para as amostras BR 4 como BR 16 o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre as resistências à compressão destas de acordo com sua posição na parede do bloco. Logo, realizou-se o teste Tukey tanto para as amostras BR4 como BR16 conforme demonstra a Figura 14 a seguir.

O Teste estatístico Tukey forneceu o mesmo resultado tanto para as amostras dos blocos BR 4 como BR 16. Logo, foi possível concluir que as amostras retiradas tanto da região superior como inferior da parede do bloco apresentaram valores de resistência à compressão axial equivalentes, o mesmo não foi verificado para as amostras extraídas da região intermediária do bloco. Tal fato pode ser explicado pelo processo de vibração, durante a fabricação do bloco, em que as faces superior e inferior por estarem em contato direto com a prensa hidráulica são vibradas de forma equivalente e superior à região central do bloco, apresentando então valores de resistência equivalentes entre si e superiores à região central. A Figura 15 a seguir ilustra o referido fato.

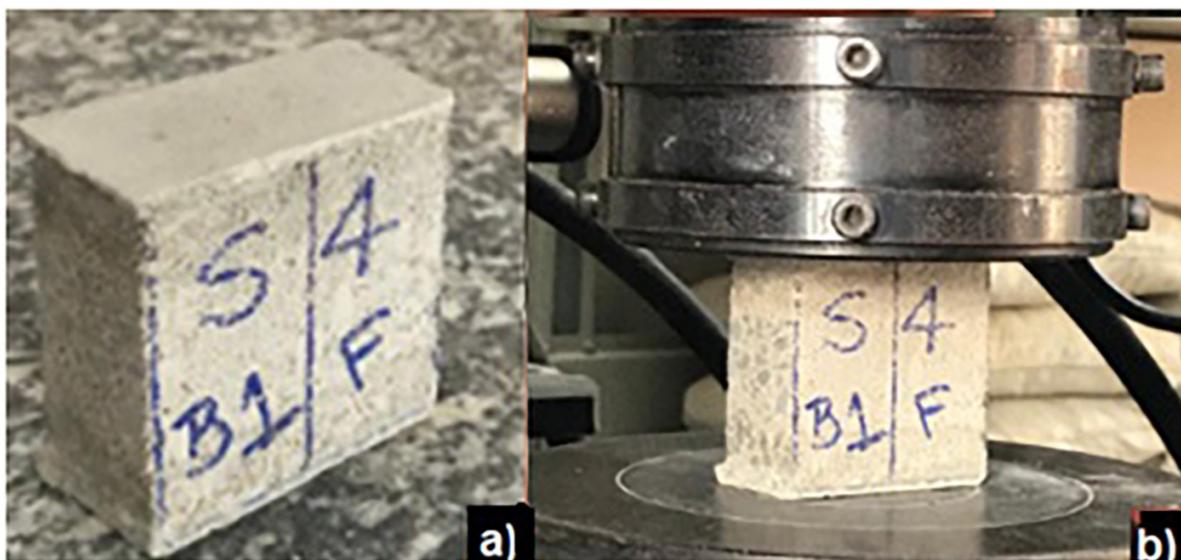


Figura 13: Amostras: a) capeamento com pasta de cimento; b) ensaio na prensa. Fonte: Autor (2022).

Tabela 9: Resistência à compressão axial (MPa) aos 28 dias – serra circular manual + capeamento com pasta de cimento.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) AOS 28 DIAS – SERRA CIRCULAR MANUAL + PASTA DE CIMENTO						
CP nº	AMOSTRAS BR 4			AMOSTRAS BR 16		
	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR	SUPERIOR	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR
Média (MPa) (n = 6)	24,00	19,07	24,03	56,56	42,32	55,77
Desvio padrão	2,30	2,68	2,66	3,12	2,85	3,56
Coef. Variação (CV)	10%	14%	11%	6%	7%	6%

Tabela 10: ANOVA para verificar se ocorre variação da resistência à compressão da amostra BR 4 de acordo com sua posição na parede do bloco.

ANOVA						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	97,7169	2	48,85845	7,50751	0,005504	3,68232
Dentro dos grupos	97,61915	15	6,507943			
Total	195,33605	17				

Tabela 11: ANOVA para verificar se ocorre variação da resistência à compressão da amostra BR 16 de acordo com sua posição na parede do bloco.

ANOVA						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	97,7169	2	48,85845	7,50751	0,005504	3,68232
Dentro dos grupos	97,61915	15	6,507943			
Total	195,3361	17				

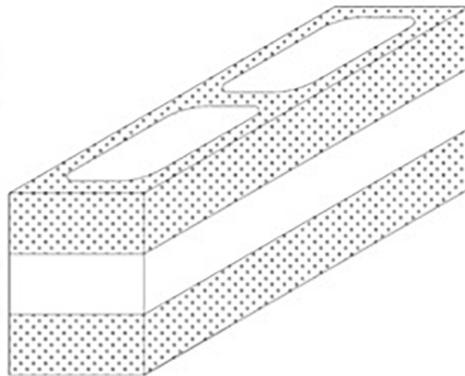


Figura 14: Regiões superior e inferior do bloco de concreto que apresentam maior resistência devido ao processo de vibração durante sua fabricação. Fonte: Autor (2023).

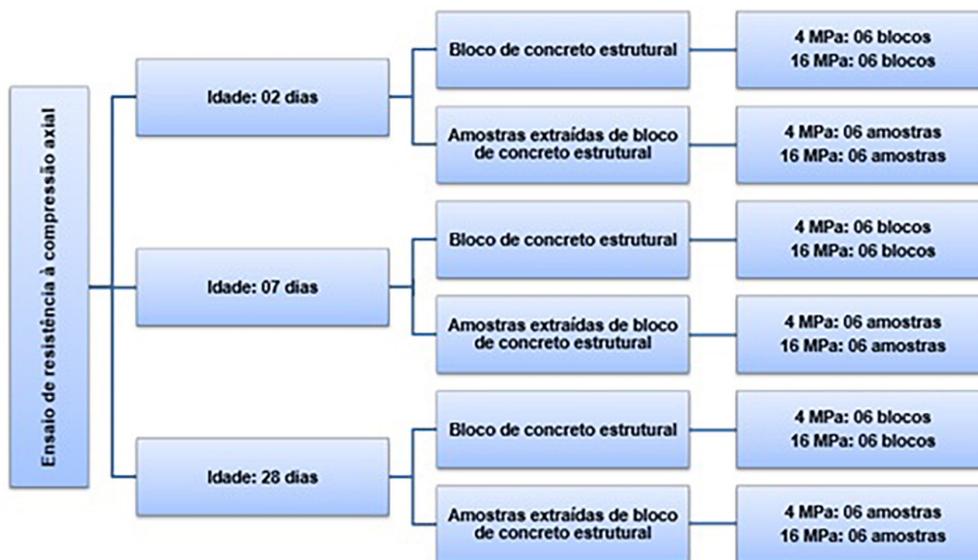


Figura 15: Fluxograma dos ensaios de resistência à compressão das amostras e dos blocos, afim de obter o coeficiente de correlação entre amostras e blocos com 4MPa e 16MPa, aos 02, 07 e 28 dias. Fonte: Autor (2022).

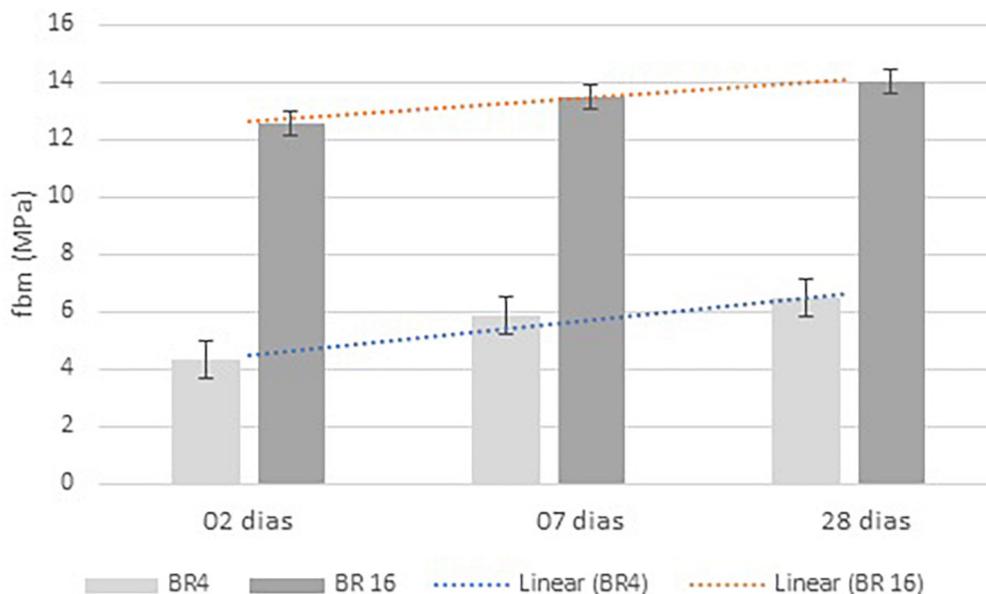


Figura 16: Resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16. Fonte: Autor (2023).

Dessa maneira, conclui-se que as amostras podem ser extraídas tanto da região superior, como inferior das paredes longitudinais dos blocos BR 4 e BR 16.

3.1.3. Estágio 3

- Correlação entre a resistência à compressão axial das amostras x blocos com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias. Após a definição do local ideal em que as amostras foram retiradas do bloco, iniciou-se a obtenção do fator de correlação entre a resistência à compressão axial das amostras com 4MPa e 16MPa, aos 02, 07 e 28 dias (ABNT NBR 5739:2018 [23]) e resistência à compressão axial dos blocos de 4MPa e 16MPa, aos 02, 07 e 28 dias (ABNT NBR 6136:2016 [24] e ABNT NBR 12118:2013 [20]). O fluxograma da Figura 16 representa os ensaios que foram realizados a fim de obter as correlações mencionadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resistência à compressão axial dos blocos com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias

Após a definição dos traços objeto de estudo da pesquisa (BR 4 e BR 16), os blocos foram fabricados novamente e ensaiados aos 02, 07 e 28 dias. Os resultados foram apresentados na Tabela 12, a seguir.

O gráfico contido na Figura 17 ilustra o ganho de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16. Percebe-se que as linhas de tendência para as duas resistências são paralelas, o que indica haver comportamento semelhante em relação ao ganho de resistência a compressão com idade.

Com o intuito de verificar se houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial obtidas aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16, realizou-se o teste estatístico ANOVA e os resultados encontram-se na Tabela 13 e 14, respectivamente.

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “F_{crítico}”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial em todas as idades. Logo, comprova-se o ganho de resistência para os blocos BR 4 com a idade.

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “F_{crítico}”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial. Logo, não houve incremento de resistência para os blocos BR 16 ao longo do tempo.

Os blocos BR 4 e BR 16 apresentaram um padrão de ruptura cônica (Figura 18 a)) e vertical (Figura 18 b)), típicas da compressão de um corpo de prova confinado nas extremidades. LONG *et al.* [25], BARBOSA e HANAI [17, 18], ARYANA [26], FORTES *et al.* [21], observaram o mesmo tipo de ruptura. A Figura 18 demonstra a ruptura dos mencionados blocos.

Tabela 12: Teste Tukey relacionando resistências à compressão das amostras dos blocos BR 4 e BR 16 e suas posições no bloco.

	INTERMEDIÁRIA	INFERIOR
Superior	DS	EQ
Intermediária		DS

DS – diferença significativa

EQ – equivalentes

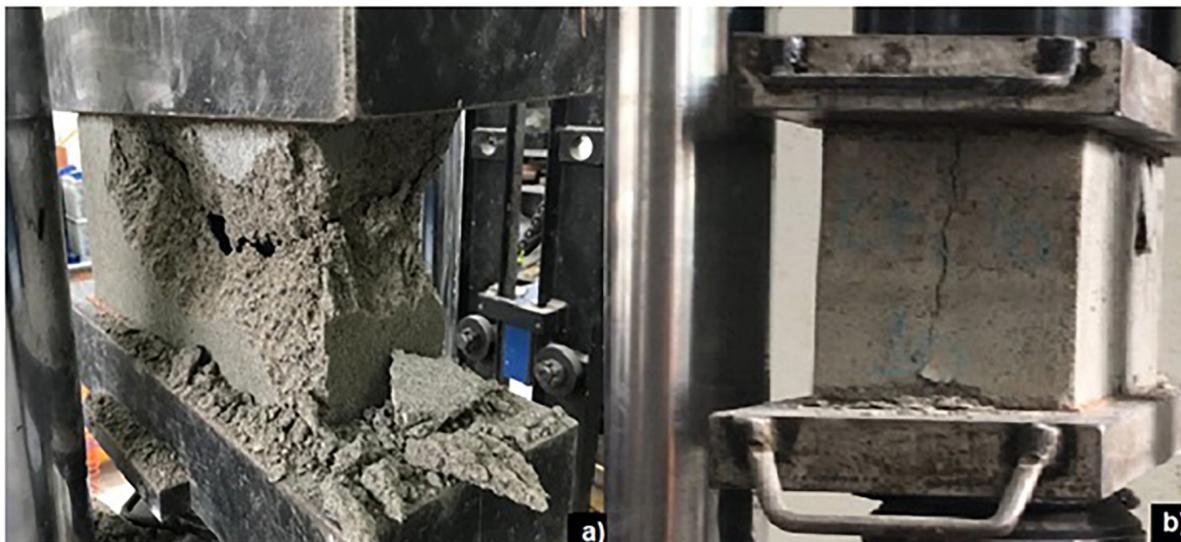


Figura 17: Ruptura dos blocos: a) BR 4; b) BR 16. Fonte: Autor (2022).

Tabela 13: Ensaio de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para os blocos BR 4 e BR 16.

CP nº	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)					
	BLOCOS BR 4			BLOCOS BR 16		
	2 dias	07 dias	28 dias	02 dias	07 dias	28 dias
fbm (MPa) (n = 6)	4,31	5,86	6,51	12,56	13,50	14,02
Desvio padrão	0,46	0,25	0,18	1,28	1,00	0,6
Coef. Variação (CV)	10,77%	4,24%	2,81%	10,17%	7,41%	4,31%

Tabela 14: ANOVA para resistência à compressão axial para blocos BR 4.

ANOVA						
<i>FONTE DA VARIAÇÃO</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	15,28004	2	7,640022	61,53423	5,89E-08	3,68232
Dentro dos grupos	1,862383	15	0,124159			
Total	17,14243	17				

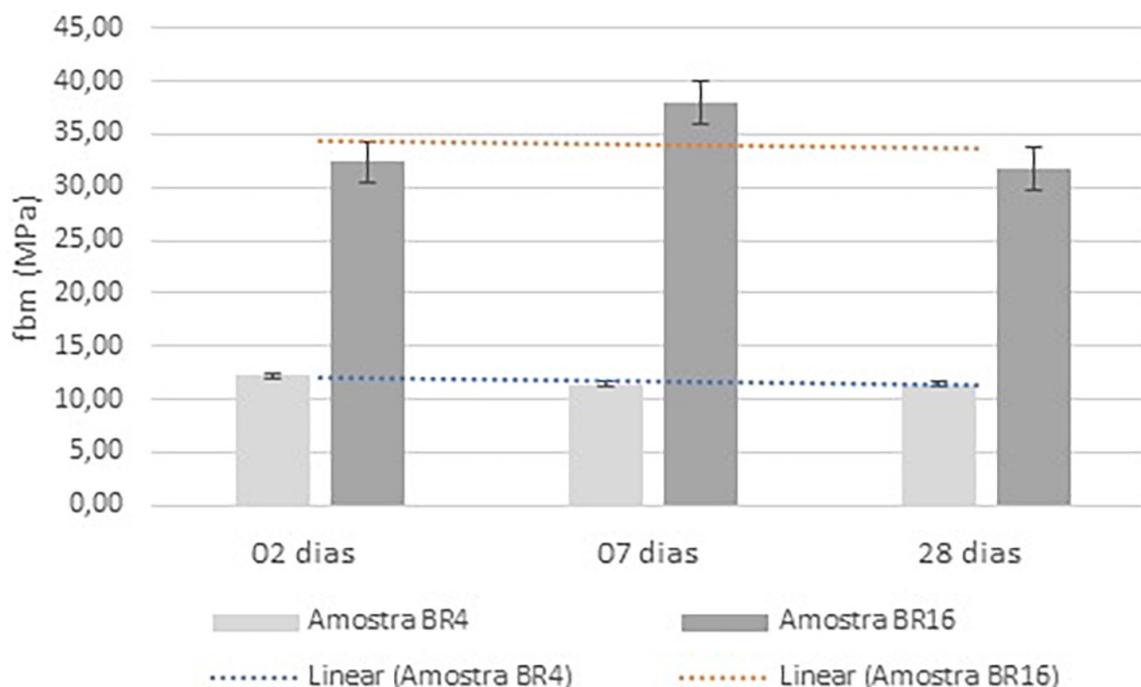


Figura 18: Resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras BR 4 e BR 16. Fonte: Autor (2023).

4.2. Resistência à compressão axial das amostras com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias

Amostras BR 4 e BR 16 foram extraídas com auxílio da serra circular manual, capeadas com pasta de cimento e submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias. Os resultados foram apresentados na Tabela 15, a seguir.

O gráfico contido na Figura 19 ilustra o comportamento da resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras BR 4 e BR 16. Percebe-se que as linhas de tendência para as duas resistências são paralelas e praticamente retas, o que indica não haver ganho significativo de resistência a tração na flexão com idade.

Com o intuito de verificar se houve diferença significativa entre as médias das resistências à compressão axial obtidas aos 02, 07 e 28 dias para as amostras BR 4 e BR 16, realizou-se o teste estatístico ANOVA e os resultados encontram-se na Tabela 16 e 17, respectivamente.

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 4 com o passar dos dias.

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial em todas as idades.

Então realizou-se teste estatístico ANOVA entre as amostras de BR 16 e os resultados encontram-se na Tabela 18, 19 e 20.

Observou-se que o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial entre as idades de 02 e 07 dias. Pelos valores das médias verifica-se um incremento de resistência.

Observou-se que por poucos décimos o valor de “F” obtido foi maior que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial entre as idades de 07 dias e 28 dias. Pelos valores das médias verifica-se um decréscimo de resistência com o passar dos dias.

Verificou-se que o valor de “F” obtido foi menor que o “Fcrítico”. Portanto, concluiu-se que não houve diferença significativa entre os valores de resistências à compressão axial das amostras BR 16 nas idades analisadas. Logo, não houve acréscimo, nem decréscimo de resistência para as amostras de BR 16 aos 02 e 28 dias.

As amostras BR 4 e BR 16, apresentaram um padrão de ruptura com fissuras na vertical, típica da compressão de um corpo de prova confinado nas extremidades como mostrado na Figuras 19 e 20 em todas as idades. As Figuras 19 e 20 demonstram a ruptura das mencionadas amostras.



Figura 19: Ruptura das amostras dos blocos BR 4. Fonte: Autor (2023).

Tabela 15: ANOVA para resistência à compressão axial para blocos BR 16.

ANOVA						
<i>FONTE DA VARIAÇÃO</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	6,637478	2	3,318739	2,931846	0,084188	3,68232
Dentro dos grupos	16,97943	15	1,131962			
Total	23,61691	17				

Tabela 16: Ensaio de resistência à compressão axial aos 02, 07 e 28 dias para as amostras com BR 4 e BR 16.

CP n°	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)					
	AMOSTRAS BR 4			AMOSTRAS BR 16		
	02 dias	07 dias	28 dias	02 dias	07 dias	28 dias
fbm (MPa) (n = 6)	12,20	11,45	11,4	32,4	37,96	31,74
Desvio padrão	1,03	2,1	2,04	1,82	2,56	5,7
Coef. Variação (CV)	8,47%	18,33%	17,92%	5,62%	6,73%	17,96%

Tabela 17: ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 4.

ANOVA						
<i>FONTE DA VARIAÇÃO</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	2,431744	2	1,215872	0,315266	0,734313	3,68232
Dentro dos grupos	57,84983	15	3,856656			
Total	60,28158	17				

Tabela 18: ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16.

ANOVA						
<i>FONTE DA VARIAÇÃO</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	139,905	2	69,95251	4,128416	0,037287	3,68232
Dentro dos grupos	254,1623	15	16,94415			
Total	394,0673	17				

Tabela 19: ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 e 07 dias.

ANOVA						
<i>FONTE DA VARIAÇÃO</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	92,68521	1	92,68521	15,69329	0,00268	4,964603
Dentro dos grupos	59,06042	10	5,906042			
Total	151,7456	11				
Total	394,0673	17				

Tabela 20: ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 07 e 28 dias.

ANOVA						
<i>FONTE DA VARIAÇÃO</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	115,8787	1	115,8787	4,946347	0,050349	4,964603
Dentro dos grupos	234,2712	10	23,42712			
Total	350,1499	11				

**Figura 20:** Ruptura das amostras dos blocos BR 16. Fonte: Autor (2023).

4.3. Correlação entre resistência das amostras e blocos com 4 e 16 MPa aos 02, 07 e 28 dias

As resistências à compressão axial dos blocos e amostras extraídas dos blocos com 4MPa e 16 MPa foram correlacionadas. Na análise de correlação entre conjunto de dados, o coeficiente de correlação varia de -1 a 1 , sendo que um valor absoluto de exatamente 1 implica que uma equação linear descreve perfeitamente a relação entre X e Y , com todos os pontos de dados situados em uma linha, conforme indica MOORE *et al.* [27].

A Tabela 21 indica os valores individuais dos resultados e o coeficiente de correlação obtido para cada idade e para cada resistência de bloco. Também é indicado o coeficiente de correlação para o conjunto todo de dados. No caso do bloco BR4, o coeficiente de correlação entre a resistência de blocos de concreto e a resistência considerando todas as idades retiradas desses blocos é de aproximadamente $0,02$ o que indica uma correlação praticamente inexistente, no conjunto das três idades. Portanto, existe forte diferença entre as correlações entre as idades. Nas idades de 2 dias e 7 dias, os fatores de correlação obtidos são $0,63$ e $0,51$, respectivamente, sugerindo uma correlação moderada. Na idade de 28 dias, a correlação aumenta para aproximadamente $0,82$, sugerindo uma correlação muito forte. Conclusão semelhante é possível de se observar para o caso BR16. Os coeficientes de correlação obtidos foram $0,30$; $0,43$, $0,14$ e $0,92$, para o conjunto de todas as amostras, e para as idades de 2, 7 e 28 dias, respectivamente. Desta forma, a correlação entre a resistência da amostra e do bloco é diferente conforme idade, é sujeita a maior variação para as idades de 2 e 7 dias, porém tende a uma boa correlação para a idade de 28 dias.

Nas tabelas 22 e 23, são indicados os valores médios e a correlação entre a resistência da amostra e a resistência do bloco a cada idade. Ainda que os resultados em idades menores sejam mais variáveis, verifica-se que a correlação para as amostras e blocos com 4 MPa e 16MPa, aos 02 dias é maior e aos 28 dias é menor.

Traçando-se um paralelo com os blocos, acredita-se que esse comportamento é esperado, uma vez que a relação tração e compressão nas menores idades também é maior e se reduz com o passar dos dias, ficando na faixa de 2, devido a relação de área bruta e área líquida.

Tabela 21: ANOVA para resistência à compressão axial para amostras dos blocos BR 16 aos 02 e 28 dias.

ANOVA						
<i>FONTE DA VARIAÇÃO</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>VALOR-P</i>	<i>F CRÍTICO</i>
Entre grupos	1,293633	1	1,293633	0,060171	0,811186599	4,964603
Dentro dos grupos	214,993	10	21,4993			
Total	216,2866	11				

Tabela 22: Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa e 16MPa.

IDADE (dias)	BR 4				BR 16			
	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)		COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA CADA IDADE	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA TODO O CONJUNTO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)		COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA CADA IDADE	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA TODO O CONJUNTO
	AMOSTRA	BLOCO			AMOSTRA	BLOCO		
2	10,03	3,76	0,63	-0,02	32,16	11,16	0,43	0,30
	12,88	3,93			29,38	11,46		
	12,32	4,02			34,99	11,94		
	12,48	4,40			31,05	12,17		
	12,22	4,62			33,69	14,18		
	13,27	5,12			33,12	14,42		
7	8,36	5,44	0,51	-0,02	38,02	11,82	0,14	0,30
	13,53	5,67			41,21	13,32		
	9,26	5,79			33,48	13,34		
	13,21	5,99			38,64	13,57		
	13,51	6,10			36,20	14,09		
	10,82	6,14			40,19	14,83		
28	8,63	6,17	0,82	-0,02	26,89	13,29	0,92	0,30
	10,09	6,35			27,51	13,36		
	10,14	6,57			27,86	14,06		
	11,55	6,64			31,03	14,10		
	13,38	6,64			33,86	14,23		
	14,58	6,66			43,30	15,10		

Tabela 23: Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 4MPa.

CP n°	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) – 4 MPa					
	02 dias		07 dias		28 dias	
	Amostras BR 4	Blocos BR 4	Amostras BR 4	Blocos BR 4	Amostras BR 4	Blocos BR 4
Média (n = 6)	12,20	4,31	11,45	5,86	11,40	6,51
Correlação	2,83		1,95		1,75	

Tabela 24: Correlação entre as resistências à compressão axial das amostras extraídas dos blocos e blocos com 16 MPa.

CP n°	Resistência à compressão axial (MPa) – 16 MPa					
	02 dias		07 dias		28 dias	
	Amostras BR 16	Blocos BR 16	Amostras BR 16	Blocos BR 16	Amostras BR 16	Blocos BR 16
Média (n = 6)	32,4	12,56	37,96	13,50	31,74	14,02
Correlação	2,58		2,81		2,26	

Aos 28 dias existe forte correlação e observa-se a tendência, para ambas as resistências de blocos, desta ficar em torno de 2,0.

5. CONCLUSÕES

No presente artigo foi possível determinar algo inédito na literatura atual, a correlação quanto à resistência à compressão axial entre blocos fabricados e compactados em indústria (utilizando-se máquina vibro – prensa) e amostras extraídas do próprio bloco, logo com mesmo traço e processo de compactação/vibração.

Durante o processo, foi verificado que o dispositivo de corte empregado para cortar as amostras do bloco pode ser tanto a serra de corte manual como a de bancada. Quanto, ao capeamento das amostras, verificou-se menor variação quando empregado a pasta de cimento, uma vez que esta regulariza a superfície de contato amostra/prensa, tornando a superfície uniforme para receber e distribuir os esforços.

Definiu-se que, tanto a região superior, como inferior da parede longitudinal do bloco, podem ser utilizadas para extração das amostras. Tal fato pode ser explicado pelo processo de vibração, durante a fabricação do bloco, em que as faces superior e inferior por estarem em contato direto com a prensa hidráulica são vibradas de forma equivalente e superior à região central do bloco, apresentando então valores de resistência equivalentes entre si e superiores à região central.

Por fim, ao correlacionar os valores de resistência à compressão dos blocos BR4 e BR 16 e suas respectivas amostras aos 02, 07 e 28 dias; verificou-se que esta, para ambas as resistências estudadas, aos 02 dias é maior e aos 28 dias é menor. Existe maior variabilidade de resultados aos 02 e 07 dias, com baixo coeficiente de correlação para essas idades. Aos 28 dias existe forte correlação entre amostra e bloco. Observou-se a tendência, em ambos os casos, desta ficar em torno de 2,0, aos 28 dias.

Traçando-se um paralelo com os blocos, acredita-se que esse comportamento é esperado, uma vez que a relação tração e compressão nas menores idades também é maior e se reduz com o passar dos dias, ficando na faixa de 2,0, devido a relação de área bruta e área líquida.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] YE, G., “Carbon dioxide uptake by concrete through early-age curing”, Tese de M.Sc., Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canadá, 2003.
- [2] GALAN, I., ANDRADE, C., MORA, P., *et al.*, “Sequestration of CO₂ by concrete carbonation”, *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 8, pp. 3181–3186, 2010. doi: <http://doi.org/10.1021/es903581d>.
- [3] CHANG, E.E., WANG, Y.C., PAN, S.Y., *et al.*, “CO₂ capture by using blended hydraulic slag cement via a slurry reactor”, *Aerosol and Air Quality Research*, v. 12, n. 6, pp. 1433–1443, 2012. doi: <http://doi.org/10.4209/aaqr.2012.08.0210>.
- [4] ZHAN, B., POON, C., CAIJUN, S., “CO₂ curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, v. 42, pp. 1–8, 2013. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.013>.
- [5] JANG, J.G., KIM, H.J., PARK, S.M., *et al.*, “The influence of sodium hydrogen carbonate on the hydration of cement”, *Construction & Building Materials*, v. 94, pp. 746, 2015. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.121>.
- [6] SHAO, Y., MORSHED, A.Z., “Early carbonation for hollow-core concrete slab curing and carbon dioxide recycling”, *Materials and Structures*, v. 48, n. 1–2, pp. 307, 2015. doi: <http://doi.org/10.1617/s11527-013-0185-3>.

- [7] MO, L., ZHANG, F., DENG, M., *et al.*, “Effectiveness of using CO₂ pressure to enhance the carbonation of Portland cement-fly ash-MgO mortars”, *Cement and Concrete Composites*, v. 70, pp. 78–85, 2016. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.013>.
- [8] FORTUNATO, L.R., PARSEKIAN, G.A., JUNIOR, A.N., “CO₂ capture of concrete units for pavement through accelerated carbonation cure”, *International Journal of Masonry Research and Innovation*, v. 7, n. 3, pp. 233–265, 2022. doi: <http://doi.org/10.1504/IJMRI.2022.122517>.
- [9] FORTUNATO, L.R., PARSEKIAN, G.A., NEVES, A., “Developing an easy-to-build laboratory chamber for CO₂ experiments”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 28, n. 2, pp. e20230078, 2023. doi: <http://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2023-0078>.
- [10] BECICA, I.J., HARRIS, H.G., “Behavior of hollow concrete masonry prisms under axial load and bending”, *The Masonry Society Journal*, v. 2, n. 2, pp. 1–26, 1983.
- [11] FRASSON JÚNIOR, A.F., “Metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para a alvenaria estrutural”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- [12] PRUDÊNPIO JÚNIOR, L.R. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <claudius@sc.usp.br> em 5 ago, 2003.
- [13] MARZAHN, G.A., “Extended investigation of mechanical properties of masonry units”, In: *North American Masonry Conference*, pp. 813–24, 2003.
- [14] BARBOSA, C., HANAI, J.B., “Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte”, *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 8, n. 34, pp. 45–74, 2006.
- [15] BUTTLER, A.M., “Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural”, Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [16] GANZERLI, S., *et al.* “Compression strength testing for nonstandard concrete masonry units”. In: *North American Masonry Conference*, pp. 60–71, 2003.
- [17] BARBOSA, C.S., HANAI, J.B., “Comparison of standard test results and in-place mechanical properties of embedding mortars and concrete blocks”. In: *International Brick & Block Masonry Conference*, 2008a.
- [18] BARBOSA, C.S., HANAI, J.B., “Deformability of hollow concrete blocks and platen effect on axial compression tests”, In: *International Brick & Block Masonry Conference*, 2008b.
- [19] BENITTEZ, L.H., “Utilização de escória de aciaria na fabricação de blocos de concreto”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 12118:2013. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio*, Rio de Janeiro, ABNT, 2013.
- [21] FORTES, E.S., PARSEKIAN, G.A., FONSECA, F.S., “Relationship between the Compressive Strength of Concrete Masonry and the Compressive Strength of Concrete Masonry Units”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 9, pp. 04014238, 2015. doi: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001204](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001204).
- [22] FORTES, E.S., “Caracterização da alvenaria estrutural de alta resistência”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5739, Ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto – NBR 5739*, Rio de Janeiro, ABNT, 2007.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 6136:2016: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [25] LONG, L., HAMID, A.A., DRYSDALE, R.G., “Small-scale modeling of concrete masonry using 1/2-scale units: a preliminary study”, In: *Proceedings of the Tenth Canadian Masonry Symposium*, Banff, Canada, pp. 484–493, 2005.
- [26] ARYANA, S.A., “Statistical analysis of compressive strength of clay brick masonry prisms,” Tese de M.Sc., Civil Engineering the University of Texas, Arlington, 2006.
- [27] MOORE, D.S., MCCABE, G.P., CRAIG, B.A., *Introduction to the practice of statistics*. Austin, W. H. Freeman, 2018.