

Influência do Tipo de Medição e da Velocidade de Carregamento e Descarregamento da Máquina de Ensaio na Determinação da Resistência à Compressão do Concreto

Suélio da Silva Araújo¹
Gilson Natal Guimarães^{2}*
André Luiz Bortolacci Geyer^{3}*

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos para o ensaio da resistência à compressão por meio de um programa interlaboratorial de ensaios em concreto endurecido, desenvolvido em dois laboratórios de Goiânia, Goiás, Brasil, para identificar e avaliar a influência de alguns fatores intervenientes nos resultados do ensaio resistência à compressão. Para isso buscou-se verificar no resultado de resistência à compressão, a influência do tipo de laboratório (A e B) e da velocidade de carregamento (0,3 e 0,6 MPa/s) em corpos de prova cilíndricos de dimensão 150 mm x 300 mm no concreto Classe C30. Concluiu-se que o tipo de laboratório influenciou significativamente os resultados de resistência à compressão. Além disso, ressalta-se que os corpos de prova de dimensão 150 mm x 300 mm do concreto Classe C30, ensaiados com velocidade de carregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentaram os resultados com as maiores dispersões.

Palavras-chave: Interlaboratorial; Concreto; Dimensão Básica; Velocidade de Carregamento e Descarregamento; Resistência à Compressão; Dispersão.

1 Introdução

A pesquisa tem o objetivo de estudar e avaliar a influência das variáveis: influência do tipo de laboratório e da velocidade de carregamento (0,3 e 0,6 MPa/s) em corpos de prova cilíndricos de dimensão 150 mm x 300 mm no concreto Classe C30; no resultado da resistência à compressão em concreto endurecido e verificar a variabilidade do resultado experimental.

2 Materiais e Programa Experimental

O programa experimental foi desenvolvido a partir de uma avaliação interlaboratorial de resistência à compressão do concreto, desenvolvido em dois diferentes laboratórios de concreto localizados na região de Goiânia, Goiás, Brasil.

Considerando-se as características do programa

-
- 1 Professor Adjunto da Universidade Paulista – Campus Brasília – Distrito Federal – Brasil e Professor do Centro Universitário UNIEURO (Instituto Euroamericano de Educação, Ciência e Tecnologia) – Distrito Federal – Brasil (suelio.araujo@gmail.com). Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás, Brasil (2011), Escola de Engenharia Civil, Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil. Ex-Bolsista do CNPq – Brasil. Ex-Professor da Universidade de Brasília. Pesquisador de Mestrado. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho. Engenheiro Civil. Tecnólogo Superior em Planejamento e Construção de Edifícios. Escritor Brasileiro. Endereço para correspondência: Rua Maria Senhorinha de Jesus, Quadra 14-A, Lote 10, Setor Oriente Ville, CEP: 74.355-666, Goiânia – Goiás – Brasil. Telefones: (62) 9635-2906 ou (61) 9181-4997.
 - 2 Professor Titular da Universidade Federal de Goiás, Brasil (rgilson.natal@gmail.com). Doutorado em Civil Engineering pela University of Texas System, Estados Unidos (1988).
 - 3 Professor Associado II da Universidade Federal de Goiás, Brasil (andre.geyer@hotmail.com). Doutorado em Engenharia Civil Construção Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil (2001). Rua Serynes Pereira Franco, nº 13, Pontal de Camburí, Vitória, ES – CEP: 29062-060. Email: ecalves1@yahoo.com.br; sauloaoviana@gmail.com.
- * Endereço para correspondência: Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Laboratório de Materiais de Construção. Av. Universitária, Pça. Universitária, s/n, Setor Universitário, CEP 74640-220, Goiânia – Goiás – Brasil.

interlaboratorial onde não é possível fixar todas as variáveis independentes, resolveu-se então pela seguinte situação de estudo:

- tipo de concreto (em um nível: classe C30);
- dimensão dos corpos de prova em um nível: 150 mm x 300 mm;
- velocidade de carregamento (em dois níveis: 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s) em corpos de prova cilíndricos de dimensão 150 mm x 300 mm no concreto Classe C30.

O corpo de prova padrão utilizado no Brasil segue o modelo de corpo de prova padrão dos Estados Unidos, que é um cilindro de 150 mm x 300 mm (Figuras 2.1 e 2.2).



Figura 2.1 – Ensaio de resistência à compressão, realizado no Laboratório de Concreto A, localizado na região de Goiânia-GOÍAS.

Como fatores limitantes do estudo têm-se:

- manteve todos os corpos de prova na mesma condição de umidade;
- máquina de ensaio com controle de carregamento, com velocidade de carregamento (em dois níveis: 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s) em corpos de prova cilíndricos de dimensão 150 mm x 300 mm no concreto Classe C30, na fase do estudo;
- materiais utilizados na fabricação do concreto: cimento Portland CP V ARI (Alta Resistência Inicial), litologia e dimensão do agregado graúdo (granito de dimensão máxima de 19 mm) e tipo de areia (areia artificial);
- resistência à compressão f_c (28dias) de 30 MPa;
- tipo de acabamento do topo dos corpos de prova (capeamento com enxofre).

Para reduzir a influência da umidade dos corpos de prova, eles foram desmoldados 24 horas após a mistura, identificados e armazenados em tanques de armazenamento por 28 dias, com umidade e temperatura controladas conforme especificado pela NBR 5738:2008 [1]. Vencido esse prazo de armazenamento, os corpos de prova foram retirados do tanque de armazenamento e estocados em um ambiente seco à temperatura ambiente.

A dosagem de concreto definida para a amostra concreto Classe C30 foi obtida por ajustes de traços de concreto com resistência f_c na ordem de 30 MPa.



Figura 2.2 – Ensaio de Resistência à Compressão, realizado no Laboratório de Concreto B, localizado na região de Goiânia-GOÍAS.

Por meio dos gráficos de comportamento do concreto foi obtido o traço para concreto com resistência estimada aos 28 dias em 30 MPa. Esse traço está apresentado na Tabela 2.1.

Foram moldados nove corpos de prova para a propriedade resistência à compressão para cada laboratório, visando atender os métodos de ensaio da NBR 5739:2007 [2].

2.1 Técnica de Avaliação

Aplicou-se a técnica de análise estatística de variância (ANOVA) contido no *software* Statsoft Statistica 7[®] para os resultados individuais encontrados nos laboratórios para as amostras de concreto Classe C30, separadamente e em conjunto. A metodologia do teste consiste na aplicação do Teste de Fisher (F).

3 Apresentação e Discussão dos Resultados

Quanto à análise principal desse estudo destaca-se que os corpos de prova foram ensaiados em réplicas e aleatorizados, antes da execução do ensaio de resistência à compressão. Essa aleatorização permite minimizar os efeitos de variáveis que não foram ou não puderam ser consideradas no experimento, como: processo de moldagem do corpo de prova, distribuição dos agregados no concreto, montagem do instrumento de medição, entre outros. Além disso, caso exista algum mecanismo de dependência entre os resultados de experimentos subsequentes, a aleatorização da execução dos experimentos permite que essa dependência

seja diluída entre todas as situações de estudo e, assim, não privilegie uma ou outra situação.

Na Tabela 3.1 estão apresentadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados para todas as situações de estudo obtidos para a amostra moldada com concreto classe C30, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade resistência à compressão.

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados individuais de resistência à compressão, para determinar os fatores estatisticamente significativos com nível de confiança de 95%.

Na Tabela 3.2 encontra-se a análise de significância dos fatores em estudo para a propriedade resistência à compressão.

A análise de variância da resistência à compressão mostrou que o valor resultante do coeficiente de determinação do modelo adotado (R^2) foi de 0,55, o que significa dizer que 55% da variação total dos dados da segunda etapa de resistência à compressão pode ser explicada pelas variáveis adotadas. Portanto, os fatores não controlados foram responsáveis por aproximadamente 45% das variações observadas no estudo.

Com respeito à intensidade de influência dos fatores, tomando-se como base a magnitude dos valores de F, pode-se constatar a grande influência do laboratório nos resultados de resistência à compressão.

As interações dos efeitos não foram estatisticamente significativas, isto é, para cada tipo de laboratório utilizado, dependendo da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, a resistência à compressão do concreto não apresenta diferença de resultado (comportamento semelhante).

Tabela 2.1 – Traço do concreto de $f_c = 30$ MPa.

Proporção dos materiais (CCV f_c 30,0 MPa) por m ³ de concreto	
Materiais	Concreto convencional vibrado (CCV) Quantidade por m ³
Cimento CP V ARI	236 kg
Areia artificial	891 kg
Brita 1 (19 mm)	999 kg
Água	172 kg
Aditivo polifuncional	1,65 kg (0,7% da massa do cimento)
Aditivo superplastificante	0,94 kg (0,4% da massa do cimento)
Adição de sílica ativa	18,9 kg (como substituição de 8% da massa do cimento)
Ensaio concreto fresco:	
Consistência	130 mm
Ar incorporado	2%

Na coluna dos valores F da Tabela 3.2 as interações que envolvem o efeito da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio x laboratório apresentaram os menores valores, indicando a menor influência dessa variável nos resultados de resistência à compressão. Destaca-se, inclusive, que o efeito individual da variável velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio não é significativa, ou seja, as velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio estudadas (0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s),

isoladamente e interagidas com laboratório, não influenciaram significativamente os resultados de resistência à compressão, porém, vale ressaltar que a amostra analisada é composta de apenas 18 corpos de prova, sendo necessário realizar mais ensaios em uma amostra maior de corpos de prova visando confirmar se essa situação se repete.

Em decorrência da ANOVA – resistência à compressão (Tabela 3.2) ter revelado os efeitos estatisticamente significativos da variável laboratório, realizou-se o agrupamento das médias homogêneas pelo

Tabela 3.1 – Análise estatística dos resultados de ensaio – resistência à compressão.

Situação de Estudo				Nº de Corpos de Prova	Resistência à Compressão (MPa)		
Dimensão (mm)	Tipo de Laboratório	Tipo de Concreto	Velocidade da Máquina de Ensaio (MPa/s)		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
—	—	—	—	18	30,9	2,3	7,3
—	—	—	0,3	8	30,1	2,8	9,4
—	—	—	0,6	10	31,5	1,6	5,0
—	A	—	—	9	32,3	0,81	2,5
—	B	—	—	9	29,5	2,4	8,1
150 x 300	A	C30	0,3	4	31,9	0,82	2,6
	A		0,6	5	32,7	0,66	2,0
	B		0,3	4	28,3	3,1	10,8
	B		0,6	5	30,4	1,4	4,6

OBS.: – Tipo de concreto: concreto Classe C30 para dimensão 150 mm x 300 mm.

– Nenhum resultado individual foi considerado como valor espúrio.

Tabela 3.2 – ANOVA – Análise Global do Experimento – resistência à compressão.

Fatores Estudados	SQ	F	p	Resultado
Modelo de Estudo	47,90	5,64	0,010	significativo
Erro (resíduo)	39,63	—	—	—
Total	87,53	—	—	—
Coeficiente de Determinação do Modelo (R ²) = 0,55				
Velocidade da Máquina de Ensaio	—	3,38	0,087	não significativo
Laboratório	—	13,36	0,003	significativo
Velocidade x Laboratório	—	0,68	0,424	não significativo

Onde: SQ = soma dos quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; p = probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como representativo da amostra; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não, R² = (1 - SQerro/SQtotal).

método de Duncan, de forma a se observar as semelhanças e diferenças dos resultados obtidos.

Nesse método ficou demonstrado que os laboratórios apresentam resultados próximos, porque a média geral de resistência à compressão do laboratório A foi de 32,3 MPa e a média geral de resistência à compressão do laboratório B foi de 29,5 MPa, isto é, o laboratório A teve média geral de resistência compressão 9% maior que a do laboratório B. Portanto, dependendo do laboratório utilizado no ensaio o valor da resistência à compressão aproxima-se.

Depois de realizar o agrupamento de médias do fator velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio pelo método de Duncan, ficou demonstrado para os dois tipos de velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio estudados, não influenciam os valores da resistência à compressão, pois a média geral de resistência à compressão do corpo de prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s foi de 30,1 MPa e a média geral de resistência à compressão do corpo de prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s foi de 31,5 MPa/s, isto é, o corpo de prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s diferiu apenas 5% da média geral de resistência à compressão comparado com o corpo de prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com

velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s.

A Figura 3.1 apresenta a análise gráfica do estudo, mostrando os resultados para cada variável analisada.

A Figura 3.1 mostra que os valores de resistência à compressão apresentam-se distantes, onde se tem um comportamento ascendente entre os laboratórios A e B.

Quanto aos corpos de prova de dimensão 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, os resultados de resistência à compressão no laboratório A, mostrados na Figura 3.1, apresentaram médias de 31,9 MPa e 32,7 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 2,6% e 2,0%. Para os corpos de prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiados com velocidades da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s no laboratório B, os resultados de resistência à compressão apresentaram médias de 28,3 MPa e 30,4 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 10,8% e 4,6%. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que o corpo de prova ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, isto é, o corpo de prova ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s teve 8,2% a mais de coeficiente de variação no laboratório B em relação ao laboratório A. O corpo de prova 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento

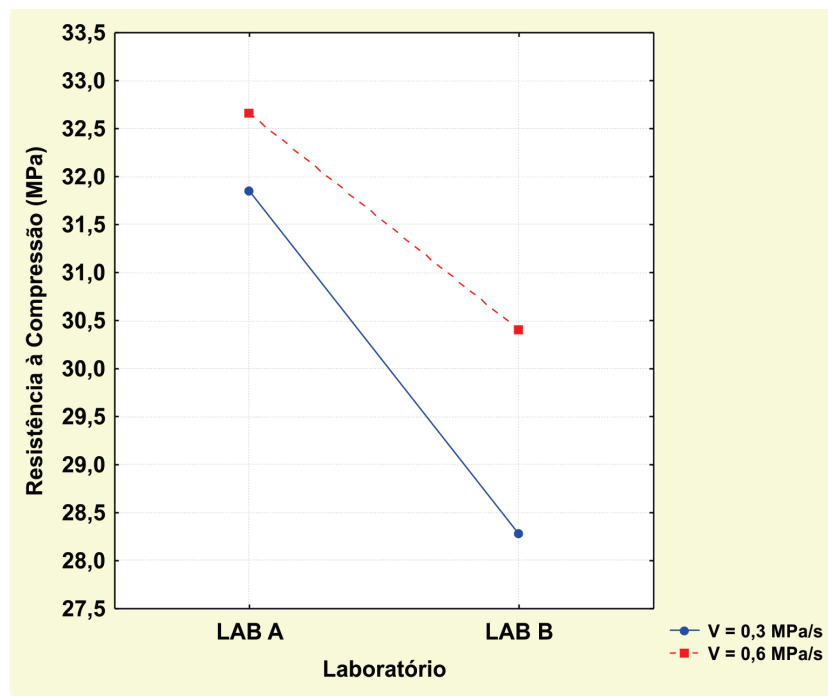


Figura 3.1 – Apresentação gráfica das situações de estudo, divididas por velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio e laboratório.

da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, ou seja, o corpo de prova ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s teve 2,6% a mais de coeficiente de variação no laboratório B comparado com o laboratório A.

Verificou-se que o laboratório B utilizado apresentou as maiores dispersões de resistência à compressão quanto à alteração da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio.

4 Considerações Finais

O verdadeiro escopo de uma pesquisa consiste em fornecer dados capazes de subsidiar respostas e soluções para as incógnitas existentes nos vários campos do conhecimento humano. Assim, as considerações finais visam compilar as informações mais importantes, arrematar os resultados e assentar os aspectos práticos do estudo, facilitando o acesso do meio técnico às descobertas científicas.

As considerações finais retiradas da apresentação e análise dos resultados expostos anteriormente consideraram: a influência do tipo de laboratório e a velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, bem como a comparação entre essas variáveis obtidas no estudo e sua aplicabilidade na análise e inspeção das estruturas de concreto.

O conhecimento da resistência à compressão do concreto é matéria de fundamental importância tanto nas etapas de projeto e execução, como no caso de avaliações sobre a qualidade das estruturas em uso. Faz-se necessário compreender os conceitos relativos, as prescrições de ensaio e as variáveis que exercem influência, para interpretar os resultados e descartar possíveis discrepâncias ocasionadas por deficiências do equipamento de ensaio ou do operador.

1. Depois de realizar o agrupamento de médias do fator velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio pelo método de Duncan, ficou demonstrado, para os dois tipos de velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio estudados, que as mesmas influenciam pouco os valores da resistência à compressão, pois a média geral de resistência à compressão do corpo de prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s foi de 30,1 MPa e a média geral de resistência à compressão do corpo de prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s foi de 31,5 MPa/s.

2. Verificou-se que o corpo de prova ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento

da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, pois teve 8,2% a mais de coeficiente de variação no laboratório B em relação ao laboratório A. O corpo de prova ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, pois teve 2,6% a mais de coeficiente de variação no laboratório B comparado com o laboratório A. Verificou-se que o laboratório B utilizado apresentou as maiores dispersões de resistência à compressão quanto à alteração da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio.

De um modo geral as etapas de inspeção das estruturas de concreto envolvem uma série de atividades que vão desde a análise e coleta de projetos e especificações até o planejamento e desenvolvimento da metodologia de investigação. Além disso a eficácia da avaliação depende de conhecimento e experiência por parte do investigador. O sucesso da aplicação das correlações obtidas neste estudo está profundamente associado à perícia do profissional e ao conhecimento prévio sobre o método de determinação da resistência à compressão do concreto.

Salienta-se que os resultados aqui obtidos são válidos para os materiais e condições de ensaios adotadas, portanto, deve-se considerar esse limite da pesquisa.

5 Agradecimentos

A todos do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, à empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda., à Furnas Centrais Elétricas, à empresa Realmix Concreteira, à Pedreira Anhanguera. Esta pesquisa foi realizada com os apoios da Universidade Federal de Goiás e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil.

6 Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- [2] _____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.