

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Antonia Carolina Sousa de Nazaré, Marcela Novischi Kataoka

Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

antoniacarolina@usp.br, kataoka@sc.usp.br

Objetivos

Os 5 Rs (Repensar, Recusar, Reduzir, Reutilizar e Reciclar) são essenciais para diminuir a geração de resíduos, especialmente na construção civil. O uso de agregados reciclados de concreto (ARC) teve início após a Segunda Guerra Mundial e, desde então, continua sendo pesquisado e aplicado até os dias atuais. O uso de agregado reciclado no concreto altera suas propriedades, como a resistência e os módulos de elasticidade estático e dinâmico. A ABNT NBR 8522-1 (2021) apresenta o modelo de Popovics como uma alternativa para estimar o módulo de elasticidade estático a partir do módulo de elasticidade dinâmico, conforme a Equação 1.

$$E_{ci} = \frac{0,4275}{\rho} \cdot E_{c,d}^{1,4} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo: E_{cd} o Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) e ρ : Densidade aparente (g/cm^3).

Este trabalho teve como objetivo verificar a aplicabilidade desse modelo na previsão do módulo de elasticidade estático em concretos com agregados reciclados de concreto (ARC).

Métodos e Procedimentos

Primeiramente, foi realizada a caracterização dos agregados naturais graúdos e miúdos, conforme as normas vigentes no país. O agregado reciclado utilizado já havia sido previamente caracterizado por Marques (2022). Com os resultados dessas caracterizações, foram determinados os traços para diferentes

níveis de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados. O método de mistura empregado, proposto por Tam, Gao e Tam (2005), está ilustrado na Figura 1.



Figura 1 - Método TSMA de mistura empregado

Foram moldados 40 corpos de prova para os diferentes traços (NAC, RAC30, RAC50 e RAC100). Ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e compressão axial foram realizados aos 7, 14 e 28 dias. O módulo de elasticidade estático foi determinado através do ensaio de compressão e do modelo de Popovics.

Resultados

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial e no módulo de elasticidade dinâmico, com base na frequência natural de vibração e via modelo de Popovics, respectivamente.

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
NAC	27,89	37,44	37,44
RAC30	28,55	35,32	29,42
RAC50	26,51	33,96	29,5
RAC100	26,13	32,06	26,26

Tabela 1 - Resistência à compressão, Módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias.

Traço	Módulo de elasticidade estático via Popovics (GPa)		
	7 Dias	14 Dias	28 Dias
NAC	24,28	27,57	28,46
RAC30	23,75	25,60	26,80
RAC50	23,49	25,67	25,75
RAC100	21,76	22,59	24,38

Tabela 2 - Módulo de elasticidade estático via Popovics (GPa).

Durante os ensaios de 7 e 14 dias, os corpos de prova com agregados reciclados mostraram maior resistência à compressão. Contudo, aos 28 dias, apenas o concreto com 30% de substituição teve resistência superior ao concreto de referência, devido a dois corpos de prova com valores acima da média. Isso resultou em um desvio padrão de 1,49 e um coeficiente de variação de 5,2%, os maiores entre os traços da mesma idade. Além disso, os módulos de elasticidade dinâmico e estático apresentaram um decaimento ao longo da utilização do ARC, como apresentado em trabalhos anteriores.

A utilização do modelo de Popovics apresentou um erro médio percentuais de -10,32%, -10,65%, -8,9% e -7,07% para o NAC, RAC30, RAC50 e RAC100, respectivamente. De acordo com a ABNT NBR 8522-2 (2021), a aplicação do modelo de Popovics nos concretos brasileiros gerou um erro médio de -6,7%.

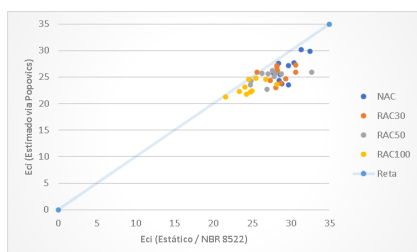


Figura 2 - Gráfico Eci medido pelo método estático versus Eci estimado pelo modelo de Popovics.

A Figura 2, apresentada anteriormente, exibe o gráfico do módulo de elasticidade estático em relação ao módulo de elasticidade estimado pelo modelo de Popovics, com todos os pontos localizados abaixo da reta. Isso evidencia que os

erros percentuais médios obtidos estão dentro de uma margem aceitável, considerando a quantidade de corpos de prova avaliados, o que indica resultados próximos à realidade.

Conclusões

O presente estudo demonstrou-se representativo ao obter resultados similares aos de Possan *et al.* (2020), com pontos situados abaixo da reta. Dessa forma, o modelo de Popovics mostrou-se capaz de estimar o valor do módulo de elasticidade estático com um erro aceitável. A avaliação do módulo de elasticidade pelo modelo de Popovics apresenta que, para traços com 30% de substituição de agregado natural por reciclado, a metodologia é consistente e segura. No entanto, é necessário cautela ao aplicá-la em traços contendo 50% ou 100% de agregados reciclados de concreto.

Agradecimentos

Ao Programa Unificado de Bolsas da Pró-Reitoria de Inclusão e Pertencimento da USP.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-2: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelas frequências naturais de vibração**. Rio de Janeiro, 2021.

MARQUES, B. B. **Estudo experimental e numérico de pilares mistos parcialmente revestidos com concreto de resíduos reciclados de concreto e fibras de aço**. 2022. 221 p. Dissertação (EESC-USP), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

POSSAN, E.; ALVES, H.; HELENE, P.; BILESKY, P.; CARRAZEDO, R.; CURTI, R. **Módulo de elasticidade dinâmico do concreto: por que utilizar**. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2018.

TAM, V. W. Y.; GAO, X.F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1195- 1203, 2005.