

Estudo do módulo de elasticidade do concreto com o uso de material alternativo

Study of the modulus of elasticity of concrete using alternative material

Estudio del módulo de elasticidad del hormigón con el uso de material alternativo

RESUMO

Nos últimos anos tem-se um crescente aumento nos estudos experimentais com enfoque em aprimorar o concreto convencional. Nesse sentido, algumas adições minerais acrescentadas ao concreto convencional estão ganhando destaque visando obter melhores perfis de resistência mecânica e durabilidade, um exemplo é o uso da sílica ativa. O presente trabalho teve como principal objetivo a análise do impacto causado pela substituição parcial do cimento pela sílica ativa sobre o módulo de elasticidade do concreto. Para tanto, substituiu-se o cimento em volume por 5%, 10% e 15% de sílica ativa, mantendo-se constante os demais materiais das misturas. Realizaram-se os ensaios de resistência à compressão axial descrito pela NBR 5739:2018 e o módulo de elasticidade regido pela NBR 8522:2017. A partir destes resultados, pode-se perceber que a resistência à compressão axial do concreto aumentou proporcionalmente com o aumento da substituição do cimento pela sílica ativa, já em relação ao ensaio de módulo de elasticidade, percebe-se que o mesmo não aumentou com a substituição, mantendo-se praticamente constante para todas as misturas estudadas. Resultado este que vai em desconformidade com as normas e bibliografias vigentes, pois as mesmas supõem que o principal fator que influencia o módulo é a resistência, muitas vezes superestimando este valor, já que não é somente um fator que influencia neste resultado. Desta forma, percebe-se uma grande necessidade de analisar as demais variáveis que podem impactar sobre o módulo de elasticidade do concreto, para que, assim, consiga-se chegar a resultados mais confiáveis e próximos do real.

Palavras-chave: resistência à compressão axial; módulo de elasticidade; concreto; sílica ativa.

ABSTRACT

In the recent years, there has been a growing increase in experimental studies focusing on improving conventional concrete. In this sense, some mineral additions added to this concrete are gaining prominence to obtain better mechanical resistance and durability profiles; an example is the silica fume use. The main objective of this work was to analyze the impact caused by the partial replacement of cement by silica fume on the modulus of elasticity of concrete. To this end, the cement in volume was replaced by 5%, 10%, and 15% of silica fume, keeping the other materials in the mixtures constant. The axial compression resistance tests described by NBR 5739:2018 and the elastic modulus governed by NBR 8522:2017 were carried out. From these results, it can be seen that the axial compression resistance of the concrete increased proportionally with the increase in the replacement of cement with silica fume. Concerning the modulus of the elasticity test, it is clear that it did not increase with the replacement, remaining practically constant for all mixtures studied. This result is at odds with current standards and bibliographies, as they assume that the main factor influences the module is resistance, often overestimating this value, as it is not just a factor influencing this result. In this way, there is a great need

Cristiane Carine dos Santos  

Universidade Federal de Santa Maria
cristianecdossantos@hotmail.com

Denise Carpena Coitinho Dal Molin  

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
dmolin@ufrgs.br

Geraldo Cechella Isaia  

Universidade Federal de Santa Maria
geraldoisaia@gmail.com

to analyze the other variables that can impact the modulus of elasticity of concrete so that more reliable results can be achieved that are close to the real thing.

Keywords: *axial compressive strength; modulus of elasticity; concrete; active fume.*

RESUMEN

En los últimos años se nota un creciente aumento en los estudios experimentales con enfoque en perfeccionar el hormigón convencional. En este sentido, algunos minerales adicionados al hormigón convencional están ganando enfoque visando obtener mejores perfiles de resistencia mecánica y durabilidad, un ejemplo es el uso de sílice activo. El presente trabajo tuvo como principal objetivo el análisis del impacto causado por la sustitución parcial de cemento en volumen por 5%, 10% y 15% de sílice activo, manteniéndose constante los demás materiales de las mezclas. Fueron realizados ensayos de resistencia para la compresión axial descrita por NBR 5739:2018 y el módulo de elasticidad regido por NBR 8522:2017. A partir de estos resultados, se puede notar que la resistencia a la compresión axial del hormigón aumentó proporcionalmente con el aumento de la sustitución del cemento por sílice activo. En relación al ensayo de módulo de elasticidad, se nota que el mismo no aumentó con la sustitución, manteniéndose prácticamente constante para todas las mezclas estudiadas. Este resultado va en desencuentro con las normas y bibliografías vigentes, visto que estas presuponen que el principal factor que influye en el módulo es la resistencia, muchas veces sobreestimando este valor, ya que no es solamente un factor que influencia en este resultado. De esta forma, se nota una gran necesidad de analizar las demás variables que pueden impactar sobre el módulo de elasticidad del hormigón, para que así logre llegar a resultados más fiables y cercanos del real.

Palabras clave: *resistencia a la compresión axial; módulo de elasticidad; hormigón; sílice activo.*

1 Introdução

Para aplicações como material estrutural, as propriedades mecânicas do concreto são as principais a serem definidas e analisadas. Dentre elas destacam-se a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, pois estão diretamente ligados ao projeto estrutural.

O módulo de elasticidade é um dos parâmetros mais importante e necessário para a realização da análise dos estados limites de serviço de uma estrutura de concreto armado. Ele permite determinar a rigidez de um material, ou seja, avalia a resistência à deformação, desta forma quanto maior for o seu valor, maior será o esforço necessário para deformar o material. Os conhecimentos relacionados a este parâmetro são imprescindíveis para as análises de projetos estruturais que estejam relacionados às deformações causadas pelas cargas aplicadas nas estruturas.

O concreto é um material compósito, possui um meio aglomerante – cimento, no qual são adicionados os demais materiais como, agregados e água. Devido a sua heterogeneidade, o mesmo apresenta um módulo de elasticidade diferente dos demais materiais, como o aço e o ferro, variando em função das matérias-primas que o compõem.

A definição dos valores de módulos de elasticidades, que são utilizados em cálculos de projetos de concreto, normalmente são estimados tanto por normas nacionais como internacionais a partir de expressões empíricas relacionando o módulo de elasticidade com a resistência do concreto. Conforme Mehta (1994), essa relação faz sentido porque o comportamento de tensão-deformação dos componentes do concreto – agregados, matriz da pasta de cimento e zona de transição na interface – são determinados pelas suas resistências individuais, que estão relacionadas à resistência última do concreto. Por outro lado, para Melo Neto e Helene (2002), a grande parte dos projetos estruturais é dimensionada baseando-se na resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), sem considerar as propriedades de deformação do material e demais características importantes para os estados limites de serviço.

Os vazios capilares, fissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são mais comuns em zonas de transição na interface do que na matriz da pasta, e a isso se deve a grande importância de determinar as

relações tensão-deformação do concreto. Entre os fatores que controlam a porosidade na zona de transição na interface destacam-se: características de exsudação; relação água/cimento; adições minerais; dimensão máxima e geometria dos agregados; granulometria; tempo de cura; temperatura; interação química entre o agregado e a pasta de cimento, etc (Mehta e Monteiro, 2008).

O módulo de elasticidade do concreto pode ser determinado com base em diferentes normas. A norma NBR 6118: 2014 recomenda que o mesmo seja determinado por meio de ensaios prescritos na NBR 8522: 2017, e caso não sejam realizados ensaios, pode-se adotar uma equação, formulada em função da resistência característica à compressão do concreto. Já as normas internacionais, como EUROCODE (2004), ACI (2014) e CEB-FIP ([2020]) indicam relações diferentes para determinar o módulo de elasticidade, que além de considerar a resistência como a norma brasileira, também relacionam à massa específica do concreto e o tipo de agregado utilizado para a fabricação.

Independente das normas vigentes para a determinação do módulo de elasticidade, a realidade é que as estruturas de concreto armado estão se tornando cada vez mais esbeltas, seja por questões arquitetônicas ou mercadológicas, fazendo com que a análise da deformabilidade seja um dos elementos mais relevantes e preponderantes, tanto nos aspectos de utilização como desempenho e manutenção das estruturas de concreto armado. Existe uma carência considerável por parte dos profissionais quanto à determinação do módulo de elasticidade, pois tanto as normas nacionais como internacionais apresentam valores obtidos empiricamente a partir da resistência à compressão que na maioria das vezes apresentam divergência nos resultados.

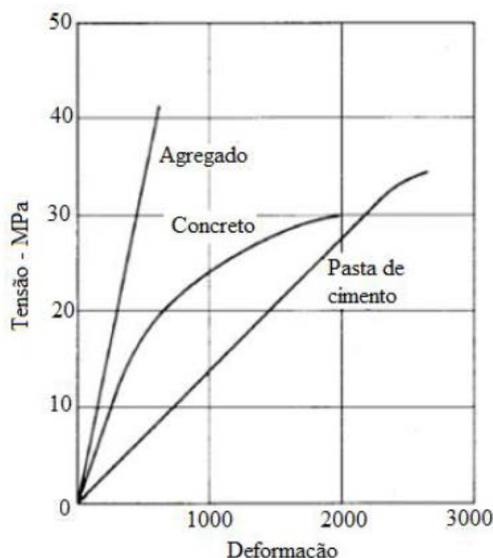
O trabalho proposto tem como objetivo analisar o efeito da substituição parcial do cimento pela sílica ativa sobre o módulo de elasticidade de diferentes misturas de concreto utilizando a norma NBR 8522: 2017.

2 Módulo de elasticidade

2.1 Fatores que influenciam o módulo de elasticidade

Pode-se afirmar que o tipo de agregado graúdo utilizado e a resistência adotada na dosagem do concreto influenciam no resultado do módulo de elasticidade. Para Neville e Brooks (2013), a influência do agregado está na análise do diagrama tensão-deformação dos diferentes elementos que compõem o concreto. Enquanto o agregado e a pasta de cimento apresentam relação tensão-deformação praticamente linear, o concreto não apresenta esta mesma relação. E esta não linearidade deve-se à presença da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, que possui vazios, concentração de cristais de hidróxido de cálcio e microfissuras, que afetam o módulo de elasticidade, principalmente devido à natureza petrográfica do agregado. Esse acontecimento pode ser visualizado na Figura 01.

Figura 1 – Comportamento tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto



Fonte: Neville e Brooks (2013).

Um dos fatores relatados por Mehta e Monteiro (2008) que torna o concreto um material de comportamento tensão-deformação não linear é a ocorrência da fissuração progressiva. Pois antes da aplicação do carregamento, a zona de transição entre o agregado e a matriz apresenta fissuras prévias, provenientes do processo de exsudação e condições de cura, acentuando ainda mais a não linearidade do diagrama tensão-deformação. Uma observação bastante importante feita pelos mesmos autores é quanto aos parâmetros de ensaio, em que os corpos de prova que são ensaiados em condições úmidas irão apresentar módulo de deformação em torno de 15% mais alto que as amostras ensaiadas em condições secas. Ao contrário da resistência à compressão, que é mais alta quando as amostras se encontram secas.

Na Tabela 01 está representado os principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto.

Tabela 1 – Influências sobre o módulo de elasticidade do concreto

Fatores que influenciam o módulo de elasticidade			
Agregados	Pasta	Zona de transição	Execução da estrutura
Natureza	Resistência	Porosidade	Adensamento
Módulo	Relação a/c	Composição	Cura
Proporção	Quantidade	Idade	Idade do carregamento
Quantidade	Idade	Resistência	Umidade
Forma	Ensaio		
Textura	Corpos de prova		Temperatura
	Aparelhagem		

Fonte: adaptado de Battagin (2008) e Benetti (2012).

2.2 Modelos de previsão empírica para o Módulo de Elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade existem vários modelos de previsão, sendo a maioria deles baseados na resistência à compressão e massa específica do concreto. Poucos desses modelos levam em consideração o tipo de agregado, acarretando muitas vezes em erros graves para a estrutura. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), foram os modelos empíricos que originaram as equações de previsão que são encontradas em normas, que devem ser utilizadas nas etapas iniciais de projeto, quando ainda não há especificações detalhadas dos materiais que irão compor a mistura de concreto. A seguir temos alguns modelos de previsão empírica utilizados para estimar o módulo de elasticidade tangente inicial - E_{ci} contidos em normas.

2.2.1 Norma NBR 6118:2014

Conforme a norma NBR 6118: 2014, o módulo de elasticidade deve ser obtido por meio das diretrizes de ensaios proposta pela NBR 8522: 2017. A norma considera o módulo tangente inicial cordal de 30% da resistência última do concreto, obtida de testemunhos da mesma amostra. Em casos de ausência de dados experimentais, é recomendado que seja utilizada a Equação 1 para a estimativa do módulo tangente inicial.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 f_{ck}^{1/2} \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;} \quad \text{Equação (1)}$$

sendo

$$\alpha_E = 1,2 \text{ para basalto e diabásio}$$

$$\alpha_E = 1,0 \text{ para granito e gnaisse}$$

$$\alpha_E = 0,9 \text{ para calcário}$$

$$\alpha_E = 0,7 \text{ para arenito}$$

Em que E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente inicial e f_{ck} é a resistência característica do concreto, ambos em unidade de megapascal (MPa).

Para verificar os Estados Limites de Serviço (ELS) e análises de projeto, deve ser utilizado o módulo de elasticidade secante, conforme a Equação 2:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto.

Sendo

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot (f_{ck}/80) \leq 1,0$$

2.2.2 CEB – FIB de 2010

O Comitê Europeu do Concreto (CEB) propõe para a determinação do módulo de elasticidade a Equação 3.

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 21500 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde f_{cm} é a resistência à compressão média na idade de interesse, em unidade de MPa. E α_e é um fator que depende da natureza do agregado, sendo 1,2 para basalto e diabásio, 1,0 para granito e gnaiss, 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

2.2.3 ACI 318 de 2014

Segundo o ACI 318: 2014, norma do American Concrete Institute, a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial é calculada pela Equação 4.

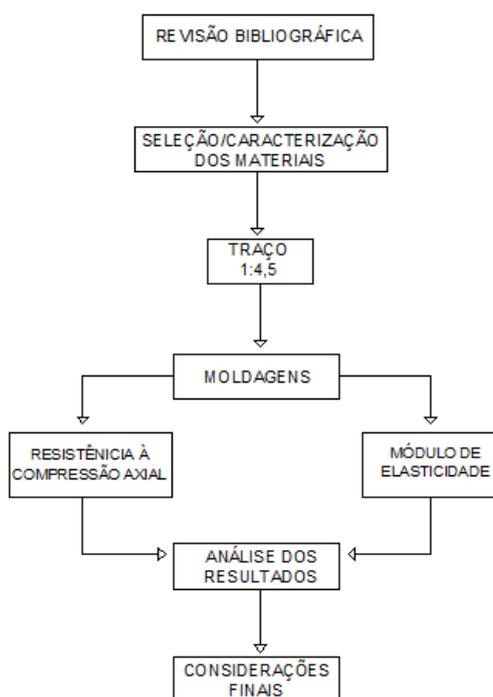
$$E_{ci} = 5170 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo f_{ck} a resistência de compressão característica aos 28 dias, em MPa, determinado a $0,45 f_c$.

3 Metodologia

A metodologia tem como objetivo estabelecer os procedimentos que devem ser seguidos para alcançar os objetivos propostos. O programa experimental está representado pelo fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Sequência do estudo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Entre tantas variáveis que interferem no módulo de elasticidade do concreto, neste estudo será realizada a análise do efeito da substituição parcial do cimento pela sílica ativa no módulo de elasticidade e a sua relação com a resistência à compressão axial.

3.1 Materiais utilizados

Para possibilitar o estudo dos diferentes teores de sílica ativa no concreto sobre o módulo de elasticidade, fez-se o uso dos seguintes materiais:

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI da marca Itambé, conforme a norma NBR 573: 1991 – Cimento Portland de alta resistência inicial –, por ser um cimento que não apresenta adições minerais em sua composição.

A caracterização química e física do cimento está representada nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Composição química do cimento

Composição química	Resultados % massa	Exigências da NBR 5733
Al ₂ O ₃	4,26	
SiO ₂	18,71	
Fe ₂ O ₃	2,95	
CaO	60,61	
MgO	3,52	≤ 6,5
SO ₃	3,12	≤ 4,5
P. Fogo	3,34	
CaO L.	0,54	
R. Ins.	0,78	
Eq. Alc.	0,69	

Fonte: Adaptado ITAMBÉ [...] ([2021]).

Tabela 3 – Composição física do cimento

Características físicas e mecânicas	Resultados % massa	Exigências da NBR 5736
Finura Blaine (cm ² /g)	4451	≥ 3000
Resíduo peneira 200 mm (%)	0,1	≤ 6,0
Resíduo peneira 350 mm (%)	0,62	-
Tempo de pega (h:m) Início	03:21	≥ 1,0
Tempo de pega (h:m) Fim	04:03	≤ 10,0
Resistência à compressão (1 dia)_MPa	24	≥ 14,0
Resistência à compressão (3 dia)_MPa	39	≥ 24,0
Resistência à compressão (7 dia)_MPa	46,1	≥ 34,0
Resistência à compressão (28 dia)_MPa	54,8	-

Fonte: Adaptado ITAMBÉ [...] ([2021]).

Os resultados estão de acordo com as exigências da NBR 5736: 1999 – Cimento Portland pozolânico.

3.1.2 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada no estudo é um pó pulverizado obtido através do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2015), deve atender aos requisitos para a Classe “E” de materiais pozolânicos. Na Tabela 4 estão os resultados de caracterização física e química.

Tabela 4 – Características físicas e químicas da sílica ativa

Massa específica	2.220 kg/m ³
Teor de SiO ₂	> 90%
Superfície específica (B.E.T)	~ 19.000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 μ m

Fonte: Adaptado Sílica Ativa (2019).

3.1.3 Agregados

Foram utilizados agregados graúdos e miúdos. Como agregado graúdo, empregou-se brita 1. Como agregado miúdo, utilizou-se areia média.

A caracterização desses materiais foi realizada conforme os ensaios a seguir:

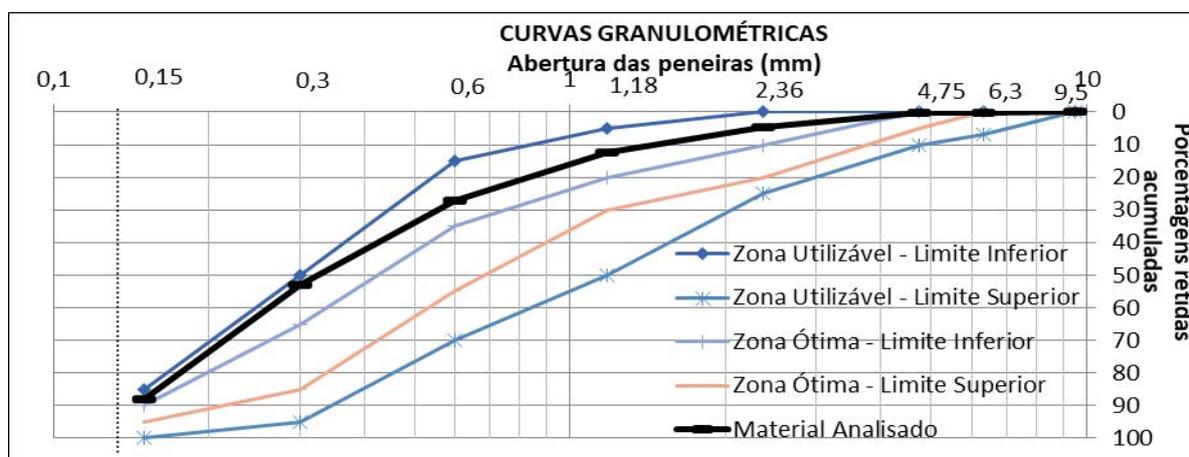
- Massa específica e aparente do agregado miúdo (NM 52:2009);
- Massa específica e aparente do agregado graúdo e absorção de água (NM 53:2009);
- Massa unitária e do volume de vazios de agregados (NM 45:2006);
- Índice de forma do agregado graúdo (NBR 7809:2008);
- Composição granulométrica (NM 248:2003);

Os resultados da caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 5, e as Figuras 3 e 4 apresentam as curvas granulométricas dos agregados.

Tabela 5 – Características físicas dos agregados

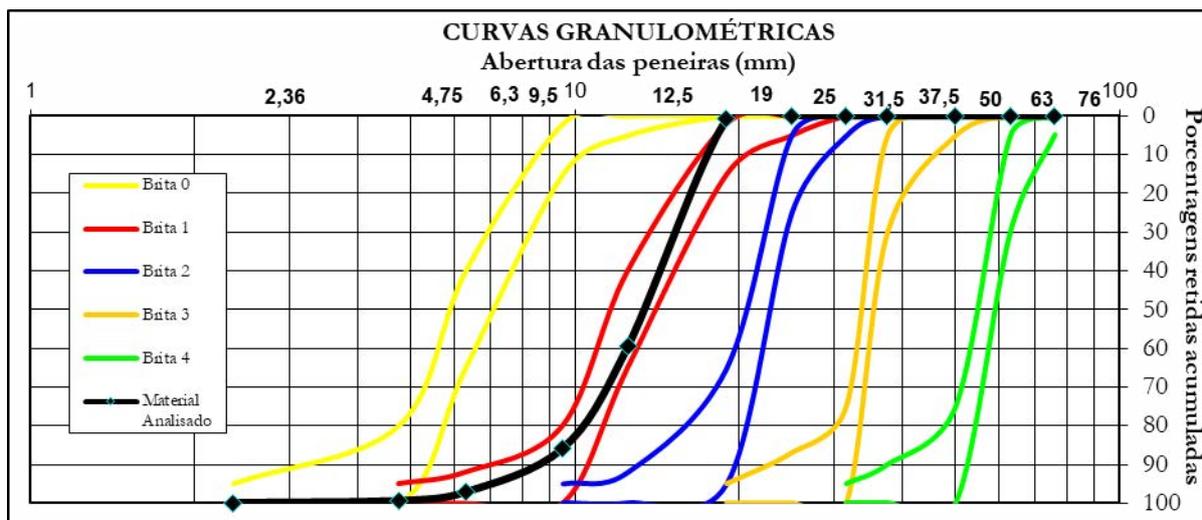
Características físicas	Areia	Brita
Massa específica (g/cm ³)	2,59	2,90
Massa unitária, (g/cm ³)	1,68	1,76
Módulo de finura	1,85	6,86
D. máx. característico (mm)	1,18	19
Absorção do agregado (%)	0,32	0,47
Coefficiente de inchamento	1,64	-
Índice de forma	-	1,58

Fonte: Elaboração própria (2020).

Figura 3 – Curva granulométrica agregado miúdo

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Figura 4 – Curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

3.1.4 Água

Para a preparação das misturas de concreto, foi utilizada água de abastecimento público da cidade de Frederico Westphalen/RS.

3.1.5 Aditivo

Foi utilizado aditivo superplastificante à base de polímeros de éter carboxílico, isento de cloretos, quando necessário para manter a consistência do concreto.

3.2 Dosagem do concreto

Para a dosagem e estudo do concreto utilizou-se: areia média natural, brita 1, sílica ativa, cimento Portland CP V-ARI e aditivo superplastificante.

Foi estabelecido como traço de concreto padrão 1:4,5:0,45 (1 de cimento: 4,5 de agregados: 0,45 relação a/c), em massa. Manteve-se o traço e realizaram-se as substituições para as análises. Conforme apresentado na metodologia de Recena (2011), que desenvolveu uma sistemática didática definindo um teor de argamassa ideal para o concreto convencional, fixou-se o teor de argamassa em 54%. O abatimento do troco de cone foi realizado conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998) em que se fixou o valor de 100 ± 20 mm; e para melhorar a consistência do concreto, foi necessário utilizar aditivo redutor de água.

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos de dimensão 10x20 cm foi realizada conforme a ABNT NBR 5738 (ABNT, 2016). Passadas 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e levados à câmara úmida para serem curados durante 28 dias. Finalizado o período de cura, os mesmos foram submetidos aos ensaios mecânicos de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.

3.3 Resistência à compressão axial

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram moldados 3 corpos de prova de dimensões 10 x 20 mm para serem rompidos aos 28 dias de idade, conforme recomenda a NBR 5739 (ABNT, 2007). Antes de serem rompidos, os mesmos foram retificados e em seguida submetidos à prensa hidráulica.

O valor obtido serviu de referência para estabelecer o plano de carregamento para o módulo de deformação do concreto. Os traços estudados e o consumo de materiais por metro cúbico de concreto estão representados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 – Composição dos traços estudados

Composição do traço	Traço (em massa)	Cimento Portland	Sílica ativa (%)	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação a/mc	Aditivo (%)	Slump test (cm)
Referência	1: 0: 1,97: 2,53	1	0	1,97	2,53	0,4	0,2	12
SA5	1: 0,039: 2,05: 2,63	1	5	2,05	2,63	0,4	0,31	12
SA10	1: 0,082: 2,13: 2,74	1	10	2,13	2,74	0,4	0,33	12
SA15	1: 0,13: 2,23: 2,86	1	15	2,23	2,86	0,4	0,35	9

Fonte: Elaboração própria (2020).

Tabela7 – Consumo de materiais por m³ de concreto

Consumo de materiais por m ³ de concreto						
Denominação do traço	Cimento (kg)	SA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
Referência	414,08	0	815,74	1047,62	165,63	0,828
SA5	397,18	15,42	812,82	1043,88	165,04	1,26
SA10	376,27	30,84	802,00	1029,99	162,84	1,33
SA15	355,37	46,25	791,19	1016,10	160,64	1,40

Fonte: Elaboração própria (2020).

3.4 Módulo de elasticidade

Para a realização deste ensaio, seguiram-se as recomendações estabelecidas pela norma NBR 8522 (ABNT, 2017), em que foram moldados 3 corpos de prova para serem submetidos ao ensaio na idade de 28 dias, utilizando, para o mesmo, a determinação através do módulo tangente inicial.

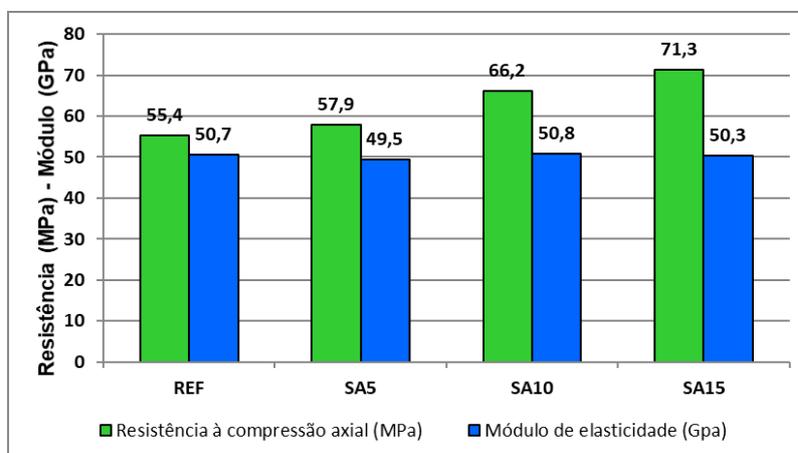
4 Resultados e discussões

4.1 Resistência à compressão axial

Essa variável pode ser considerada a mais importante, por ser esse o valor adotado como dado de entrada nos modelos matemáticos apresentados em diferentes normas: NBR 6118 (2014), CEB – FIB (2010) e ACI 318 (2014), e citações de diversos autores, estimando, desta forma, modelos teóricos para obtenção do módulo de elasticidade do concreto.

Para alcançar o objetivo proposto, adotou-se o traço de referência em massa de (1: 4,5: 0,45), para os demais traços, substituiu-se parcialmente o cimento em volume nas proporções de 5%, 10% e 15% pela sílica ativa, mantendo-se constante as demais variáveis. Na Figura 5 estão representados os traços que foram reproduzidos e os resultados obtidos.

Figura 5 – Resultados de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Ao analisar a Figura 5, pode-se perceber que a resistência à compressão axial do traço referência resultou em 55,4 MPa, sendo a menor resistência obtida entre as demais misturas estudadas. O traço com 15% de substituição de cimento pela sílica ativa atingiu cerca de 28,7% acima da resistência à compressão axial da referência. Pode-se afirmar que a resistência teve um aumento proporcional ao aumento da substituição do cimento pela sílica ativa, ou seja, aumentando-se a porcentagem de substituição, aumentou-se também a resistência à compressão. O mesmo afirmado, em relação à resistência, não pode ser levado em conta para o módulo de elasticidade, ainda analisando a Figura 5, pois o módulo se manteve praticamente o mesmo da referência mesmo com as substituições. Desta forma, o módulo de elasticidade não depende somente do aumento da resistência à compressão axial como descreve a norma NBR 6118 (2014), e sim dos demais fatores, como volume de pasta, teor de argamassa, litologia do agregado graúdo, entre outros.

No trabalho de Ali Alsalman et al. (2017), quando estudada a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência de concretos de alta resistência, verificou-se algo parecido, os resultados de resistência à compressão atingiram valores entre 124 e 162 MPa, já o módulo variou entre 37 a 46 GPa. Os mesmos autores concluíram que as equações prescritas pelas diferentes normas testadas superestimam o módulo medido para as misturas de concreto estudadas. Para Hussain et al. (2018), verificou-se que no estudo da resistência a compressão e módulo de elasticidade das diferentes misturas de concreto à equação proposta pela ACI também superestima o módulo para concretos produzidos com agregados graúdos de duas fontes diferentes, recomendando, desta forma, tentativas de modificação na equação para conseguir atingir valores mais confiáveis. Não somente nos estudos dos autores citados, o módulo de elasticidade é superestimado, acontecendo neste trabalho o mesmo comportamento caso fosse realizada a análise por meio das normas estabelecidas, pois o módulo não cresce na mesma proporção que a resistência, como verificado na Figura 5.

5 Conclusões

Portanto, com o presente estudo pode-se concluir que:

Quando se utiliza sílica ativa consegue-se aumentar a resistência à compressão axial do concreto de cimento Portland.

A resistência à compressão axial em misturas de concreto com sílica ativa cresce na medida que se aumenta a substituição do cimento pela mesma.

O módulo de elasticidade não pode ser calculado como prescreve as normas e bibliografias, levando em consideração como fator decisivo a resistência à compressão axial, pois o mesmo não cresce na mesma proporção que a resistência.

As normas atuais, relacionadas ao módulo de elasticidade, superestimam este fator por considerarem a resistência à compressão axial o principal fator de interferência deste parâmetro; não levando em consideração outros fatores que também estão relacionados, sendo muitas vezes com maior influência que a resistência à compressão axial.

Seria interessante analisar demais fatores e misturas de concreto para verificar quais possuem maior influência na determinação do módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 573**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5736**: Cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de Vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809**: Agregado graúdo: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto armado: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos: Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. São Paulo: ABNT, 2009.
- ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; PRINZ, G. S.; HALE, W. M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 153, p.918–928, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14). Michigan, EUA: ACI, 2014.
- BATTAGIN, I.L da S. **Módulo de Elasticidade do Concreto**: Normalização, fatores de influência e interface com o pré-moldado. Concrete Show. São Paulo: Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto -ABCIC. 2008.
- BENETTI, J. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, 2012.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 2**: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for building. Bruxelas, Bélgica: CEN-CENELEC, 2004.
- HUSSAIN, R. R.; SHURAIM, A. B.; ASLAM, F.; ALHOZAIMY, A. M. A.; AL-HUMAIQANI, M. M. Coupled effect of coarse aggregate and micro-silica on the relation between strength and elasticity of high performance concrete, **Construction & Building Materials**, [s. l.], v.175, p.321-332, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.029>
- ITAMBÉ cimento para toda obra. **Itambé**, Curitiba, [2021]. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/>. Acesso em: 25 set. 2021.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais São Paulo: Pini, 1994. 573p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 3. ed.. São Paulo: Editora IBRACON, 2008. 674p.
- MELO NETO, A. A. de; HELENE, P. R. do L. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44.,

2002, Belo Horizonte –MG. **Anais** [...]. Belo Horizonte: Editora IBRACON, 2002. 1 CD-ROM.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.

O CÓDIGO do modelo *fib* para estruturas de concreto. FIB MODEL CODE MC2010. Comité Euro-International du Béton. **FIB CEB-FIP**, Suíça, [2020]. Disponível em: <https://www.fib-international.org/publications/model-codes.html>. Acesso em: 19 fev. 2020.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGECC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SÍLICA ATIVA. **Tecnosil**, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em: 12 ago. 2019.

Sobre os autores

Cristiane Carine dos Santos

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI (2015), onde também foi bolsista do Programa de Educação Tutorial - PET (2014-2015) do curso de Engenharia Civil, administrado pela Secretaria de Educação Superior SESu/MEC. Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil com ênfase em Construção Civil e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM (2017), onde também foi bolsista CAPES. Doutorado em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (2020). Atualmente é professora adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (1982), mestrado em Engenharia Civil pela UFRGS (1988) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (1995). Atualmente é Professora Titular e pesquisadora (docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura) da UFRGS. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Construção Civil. Desenvolve, principalmente, os seguintes temas: tecnologia de concretos convencionais e especiais, aproveitamento de resíduos em materiais de construção, desenvolvimento de novos materiais, avaliação de desempenho de materiais e componentes da construção, patologia e recuperação de estruturas e construções, e processos construtivos. Atua, de forma equilibrada, no tripé que sustenta a universidade: (a) ensino: na graduação, foi professora homenageada pelos formandos de engenharia civil em 2002/2, 2003/1, 2004/1, 2005/1 e 2007/2 e Parainfa em 2006/1 e 2012/1. Orientou 73 bolsistas de iniciação científica e formou 90 mestres e 49 doutores; (b) pesquisa: é pesquisadora nível I do CNPq. Publicou 48 artigos em periódicos internacionais, 60 em periódicos nacionais e 507 artigos em congressos internacionais e nacionais. Possui 3 livros publicados, 1 livro editado e é autora de 13 capítulos de livro. Foi distinguida com 45 premiações e títulos honoríficos ao longo da carreira. É consultora da CAPES e do CNPq; (c) extensão: realizou diversos trabalhos em parceria com a iniciativa pública e privada, transferindo para o meio os avanços produzidos na Universidade e trazendo recursos para financiar bolsas de alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado, bem como para melhoria da infra-estrutura da graduação e pós-graduação. Na área administrativa, foi coordenadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil por duas gestões seguidas e coordenadora substituta do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura também por 2 gestões seguidas. Participou como membro da Comissão Coordenadora do PPGECC e membro do Colegiado do Departamento de Engenharia Civil em diversas gestões. Fez parte, ainda, do Conselho da Escola de Engenharia e do Fórum dos Coordenadores da UFRGS. Foi diretora da Escola de Engenharia da UFRGS na gestão 2008-2012. Foi membro fundador da Associação Brasileira de Patologia das Construções - ALCONPAT Brasil. Atualmente é membro do núcleo docente estruturante do curso de engenharia civil e líder do Grupo de Pesquisa LAMTAC (Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído) da UFRGS. (Texto informado pelo autor)

Geraldo Cechella Isaia

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1965), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1990) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (1995). É professor Titular aposentado (em 1995) e como professor Associado (2013) pela Universidade Federal de Santa Maria e professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, fazendo parte atualmente deste programa como Professor Voluntário. É ex-membro comitê assessor engenharias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e CNPq, membro do conselho editorial da Revista IBRACON de Materiais, da revista E-Mat (Porto Alegre) e revisor dos periódicos Ambiente Construído (ANTAC), Construction & Building Materials, Cement Concrete & Composites, Computers and Concrete, Journal of Civil Engineering and Construction Technology, entre outros. É senior member da Réunion Internationale Des Laboratoires D'essais Et de Recherches Sur Les Matériaux (RILEM) e, ainda membro da Fédération International du Béton (Fib) e do American Concrete Institute (ACI). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção, atuando principalmente nos seguintes temas: durabilidade, adições minerais e pozolanas, sustentabilidade da construção com ênfase na Avaliação do Ciclo de Vida, patologia e recuperação de construções em especial as de patrimônio histórico. Possui cinco (5) prêmios de destaque na Engenharia Nacional pelo Instituto Brasileiro do Concreto, finalista do 48º Premio Jabuti (2006), bolsa-prêmio para participação do World Sustainable Building Conference em Toquio (2004) e distinção entre os 5 melhores trabalhos apresentados no 10th International Congress on the Chemistry of Cement, em Gotenburg (1997).

Avaliado em: 23.10.2023

Aceito em: 08.11.2023