

Efeitos da forma e do módulo de elasticidade dos agregados graúdos, dos parâmetros de dosagem e suas interações sobre o módulo de elasticidade do concreto

Effects of coarse aggregates shape and modulus of elasticity, mix design parameters and their interactions on concrete modulus of elasticity

Cristiane Carine dos Santos¹, Denise Carpena Coitinho Dal Molin², Geraldo Cechella Isaia³, João Ricardo Masuero², André Lübeck³

¹Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Avenida Roraima, 1000, Camobi, CEP: 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infra-estrutura. Avenida Osvaldo Aranha, 99, CEP: 90035-190, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

³Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Avenida Roraima, 1000, Camobi, CEP: 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: cristiane.c.santos@ufsm.br, dmolin@ufrgs.br, geraldoisaia@gmail.com, joao.masuero@ufrgs.br, andrelubeck@gmail.com.

RESUMO

Este estudo avaliou a influência das diferentes variáveis (teor de pasta, relação a/c, forma e módulo de elasticidade do agregado graúdo) e suas interações, sobre o módulo de elasticidade estático do concreto de cimento Portland. Foram fixados três teores de pasta (24,7%, 19,8% e 16,5%), três relações água/cimento (0,38, 0,48 e 0,58), mediu-se o módulo de elasticidade das quatro rochas selecionadas (basalto, diabásio, calcário e granito), para o basalto e o diabásio utilizou-se três formas de agregado graúdo (com beneficiamento, intermediário e sem beneficiamento), e para o calcário e granito apenas uma forma (sem beneficiamento). Após a seleção e estudo dos diferentes materiais utilizados para a produção dos concretos, foram produzidas diferentes misturas para avaliação da resistência à compressão e módulo de elasticidade, ambos medidos aos 28 dias de idade do concreto. As interações entre as variáveis apresentaram influências sobre o módulo de elasticidade do concreto, porém a variável teor de pasta, de primeira ordem, apresentou o maior impacto, em todas as situações analisadas. Portanto, os resultados confirmaram que todas as variáveis avaliadas e suas interações possuem influência significativa sobre o módulo de elasticidade do concreto.

Palavras-chave: concreto; teor de pasta; resistência característica à compressão; forma do agregado graúdo; módulo de elasticidade do agregado graúdo.

ABSTRACT

This study evaluated the influence of different variables (paste content, w/c ratio, shape and modulus of elasticity of coarse aggregate) and their interactions on the static modulus of elasticity of Portland cement concrete. Three slurry contents (24.7%, 19.8% and 16.5%) were fixed, three water/cement ratios (0.38, 0.48 and 0.58), the elastic modulus of the four selected rocks (basalt, diabase, limestone and granite), for basalt and diabase, three forms of coarse aggregate were used (with processing, intermediate and without processing), and for limestone and granite only one form (without processing). After the selection and study of the different materials used for the production of concrete, different mixtures were produced to evaluate the compressive strength and modulus of elasticity, both measured at 28 days of concrete age. The interactions between the variables influenced the modulus of elasticity of the concrete, but the variable paste content, first order, had the greatest impact in all situations analyzed. Therefore, the results confirmed that all the evaluated variables and their interactions have a significant influence on the concrete's modulus of elasticity.

Keywords: concrete; paste content; characteristic compressive strength; shape of the coarse aggregate; modulus of elasticity of the coarse aggregate.

1. INTRODUÇÃO

Nas etapas preliminares de projeto as estimativas do módulo de elasticidade são de extrema importância, sendo que na falta de maiores especificações elas são utilizadas na avaliação do comportamento estrutural, antes mesmo da realização dos ensaios de caracterização. De acordo com MEHTA e MONTEIRO [1] foram os modelos empíricos que deram origem as equações de estimativa encontradas nos textos normativos. Aitcin e MEHTA [2] a partir de seus estudos comprovam que existe dependência entre o módulo de elasticidade do concreto e as propriedades dos materiais que o compõe. Dessa maneira, uma alternativa seria a estimativa utilizando a formulação para materiais compósitos, mas que demandariam o conhecimento do módulo de elasticidade de cada material constituinte para a realização da estimativa do comportamento do compósito de acordo com a contribuição volumétrica no produto final.

O modelo bifásico proposto por VOIGT [3] considera os constituintes do compósito dispostos em paralelo e considera que as deformações sempre serão simultâneas e iguais. Já o modelo proposto por REUSS [4] considera os constituintes do compósito dispostos em série, e que as deformações nos componentes podem ser diferentes.

Para MEHTA e MONTEIRO [1], os modelos de Voigt e Reuss são aproximações, pois a hipótese de tensões iguais satisfaz somente as equações de equilíbrio, porém dá margem a deslocamentos descontínuos nas interfaces das fases.

HASHIN e SHTRIKMAM [5] apresentam limites mais rigorosos para a estimativa do módulo de elasticidade, utilizando a teoria dos princípios variacionais da teoria da elasticidade para materiais multifásicos de geometria de fase arbitrária. Dessa forma, MEHTA e MONTEIRO [1] afirmam a eficiência da aplicação do método para os problemas de estimativa do módulo de elasticidade do concreto, pois os limites são mais rigorosos, direcionando a resultados mais precisos, devido ao seu forte embasamento teórico empírico.

O módulo de elasticidade estático é uma propriedade imprescindível para o dimensionamento estrutural e sua previsão é complexa (YILDIRIM *et al.* [6]; NEVILLE [7]; ASLANI *et al.* [8]; KOCKAL [9]; ACI COMMITTEE 318 [10]; ZHOU *et al.* [11]; BILIR [12]; LEAL *et al.*, [13]). SOUZA *et al.* [14] também destacam a fundamental importância do módulo de elasticidade para a obtenção de tensões entre o concreto e aço em construções de concreto armado e protendido, contribuindo também para cálculo das tensões resultantes de retração e recalques nas estruturas.

LI *et al.* [15] estudaram os diferentes parâmetros que influenciam no módulo de elasticidade do concreto e concluíram que se aumentada a dimensão máxima do agregado graúdo, aumentava-se o módulo do concreto. E o aumento do volume de agregados ou redução da espessura da zona de transição também aumentava o módulo.

Os efeitos da relação água/cimento, tamanho máximo do agregado, tipo agregado e teor de cinzas volantes sobre o módulo de elasticidade do concreto foram estudados por YILDIRIM e SENGUL [6], em que os resultados permitiram afirmar que ocorreu variação do módulo de elasticidade de acordo com o tipo de agregado graúdo utilizado, e não houve uma relação direta entre módulo e resistência à compressão. Quanto a cinza volante, essa não resultou em variações significativas do módulo.

Quando JOHARI *et al.* [16] investigaram a influência de materiais cimentícios suplementares, sílica ativa, metacaulim, cinza volante e escória de alto forno granulada ou moída, perceberam que estas apresentaram grandes efeitos sobre a resistência à compressão, mas efeitos pouco significativos sobre o módulo de elasticidade. Já para SHARIQ *et al.* [17] estudando diferentes idades de ensaios e substituição parcial de cimento por escória granulada de alto forno, os traços com substituição de escória tiveram o módulo reduzido para todos os níveis substituição e idades de ensaio.

O efeito do teor de umidade no módulo de elasticidade foi investigado por LIU *et al.* [18], sendo que o módulo de elasticidade aumentou com o aumento do teor de umidade. Já CRAEYER *et al.* [19] estudaram o efeito do volume de pasta e agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto e concluíram que esses efeitos se mostraram estatisticamente significativos. JUROWSKI e GRZESZCZYK [20] estudando diferentes tipos e dimensão máxima de agregados graúdos, mantendo o mesmo volume e relação *a/c*, inferiram que essas variáveis influenciaram no módulo de elasticidade do concreto de maneira significativa.

BEUSHAUSEN e DITTMER [21] utilizaram dois tipos de agregados para as misturas de concreto e perceberam que os mesmos influenciaram nos valores de módulo de elasticidade e resistência do concreto, pois com um tipo de agregado obteve-se maior resistência e com outro maior módulo de elasticidade.

Para YANG *et al.* [22], a dimensão máxima dos agregados influenciou no módulo de elasticidade do concreto, pois diminuindo-se a dimensão máxima do agregado graúdo, diminuiu-se a resistência à compres-

são axial e o módulo de elasticidade do concreto. A influência das diferentes composições minerais de rocha foram estudadas por PIASTA *et al.* [23], em que os maiores valores de módulo de elasticidade foram observados nos concretos de dolomita e basalto e os piores, nos concretos com agregado granítico.

TIBBETTS *et al.* [24] estudaram diferentes tipos de agregados graúdos e concluíram que o módulo de elasticidade do concreto variou com o tipo de agregado graúdo utilizado. GIRARDI *et al.* [25] também estudaram a influência de diferentes parâmetros de dosagem sobre o módulo de deformação do concreto e inferiram que o volume de pasta e, por consequência, o teor e o tipo de agregado graúdo apresentaram grande influência sobre o módulo. Conforme SOUZA *et al.* [26] é necessário prever com maior precisão o módulo de elasticidade para a execução do projeto, pois o seu resultado auxilia no cálculo de deformações, no conhecimento das tensões entre o concreto e o aço das estruturas, além de contribuir para a determinação das tensões resultantes de retração e recalque.

KLEIN, LENZ e MAZER [27] investigaram a influência do empacotamento de agregados no módulo de elasticidade estático de concretos com resistência à compressão entre 25 e 40 MPa. Concluíram que o empacotamento produziu um aumento médio no módulo de elasticidade estático do concreto de 21% em 7 dias e 8% em 28 dias.

Os estudos citados, permitem concluir que entre as variáveis que influenciam de maneira significativa no módulo de elasticidade do concreto, o teor de pasta, litologia ou tipo do agregado graúdo e resistência à compressão axial do concreto apresentaram grande importância sobre o módulo de elasticidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos fixou-se três teores de pasta (24,7%, 19,8% e 16,5%), três relações água/cimento (0,38, 0,48 e 0,58), mediu-se o módulo de elasticidade das quatro rochas selecionadas (basalto, diabásio, calcário e granito), para o basalto e o diabásio utilizou-se três formas de agregado graúdo - com beneficiamento VSI (britador de eixo vertical, para deixar o agregado mais arredondado), intermediário (composto em laboratório com 50% com VSI e 50% sem VSI) e sem beneficiamento VSI -, e para o calcário e granito apenas uma forma (sem beneficiamento VSI). Assim, foi possível produzir as diferentes misturas de concreto (Tabela 1) e obter a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos mesmos. Resultados estes que foram analisados estaticamente e permitiram concluir sobre a influência das variáveis e suas interações sobre o módulo de elasticidade do concreto.

Tabela 1: Misturas de concreto.

TRAÇO	f _{ck}	Descrição	Tratamentos			COMPOSIÇÃO DO TRAÇO UNITÁRIO (kg)		
						cimento : areia : brita : a/c		
Código	(MPa)					m=4,5	m=6	m=7,5
D25	25	Diabásio	Com VSI	Intermediário	Sem VSI	1:1,97:2,53:0,58	1:2,78:3,22:0,58	1:3,59:3,91:0,58
D35	35					1:1,97:2,53:0,48	1:2,78:3,22:0,48	1:3,59:3,91:0,48
D45	45					1:1,97:2,53:0,38	1:2,78:3,22:0,38	1:3,59:3,91:0,38
B25	25	Basalto	Com VSI	Intermediário	Sem VSI	1:1,97:2,53:0,58	1:2,78:3,22:0,58	1:3,59:3,91:0,58
B35	35					1:1,97:2,53:0,48	1:2,78:3,22:0,48	1:3,59:3,91:0,48
B45	45					1:1,97:2,53:0,38	1:2,78:3,22:0,38	1:3,59:3,91:0,38
G25	25	Granito	-	-	Sem VSI	1:1,97:2,53:0,58	1:2,78:3,22:0,58	1:3,59:3,91:0,58
G35	35					1:1,97:2,53:0,48	1:2,78:3,22:0,48	1:3,59:3,91:0,48
G45	45					1:1,97:2,53:0,38	1:2,78:3,22:0,38	1:3,59:3,91:0,38
C25	25	Calcário	-	-	Sem VSI	1:1,97:2,53:0,58	1:2,78:3,22:0,58	1:3,59:3,91:0,58
C35	35					1:1,97:2,53:0,48	1:2,78:3,22:0,48	1:3,59:3,91:0,48

C45	45				1:1,97:2,53:0,38	1:2,78:3,22:0,38	1:3,59:3,91:0,38
-----	----	--	--	--	------------------	------------------	------------------

2.1 Materiais

O cimento utilizado no estudo foi o CP V-ARI [28], com massa específica 3,14 g/cm³. Como agregado miúdo foi utilizada uma areia natural, com massa específica 2,62 g/cm³ e módulo de finura de 2,07, proveniente do rio Jacuí, na cidade de Rio Pardo/RS, e como agregados graúdos foram utilizados quatro diferentes tipos de rochas: basalto da Pedreira Conpasul de Estrela/RS (com massa específica 2,95 g/cm³ e módulo de elasticidade 91,2 GPa), diabásio da Pedreira Conpasul de Itaara/RS (com massa específica 2,58 g/cm³ e módulo de elasticidade 79,2 GPa), granito da Pedreira Conpasul de Butiá/RS (com massa específica 2,67 g/cm³ e módulo de elasticidade 65,8 GPa), e calcário da Pedreira Mônimo de Bagé/RS (com massa específica 2,74 g/cm³ e módulo de elasticidade 63 GPa), todas com dimensão máxima característica de 19 mm. O módulo de elasticidade das rochas foi determinado com corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, conforme as recomendações da NBR 10341 [29]. As amostras foram ensaiadas em uma prensa hidráulica INSTRON, modelo EDX 1500. As deformações foram medidas com dois transdutores de deslocamento indutivo (LVDT) do tipo *clipgauge*, de marca Instron e com base de medida de 100 mm. As rochas de basalto e diabásio foram estudadas com diferentes formas ou níveis de beneficiamento VSI (britador de eixo vertical), com beneficiamento, sem beneficiamento e intermediário (composto por 50% com VSI e 50% sem VSI). Dessa maneira foi possível avaliar a influência da forma do agregado graúdo no módulo de elasticidade e sua interação com as demais variáveis.

Todos os materiais utilizados para a moldagem do concreto foram previamente preparados. Os agregados foram lavados e secos, visando garantir as mesmas condições para os diferentes agregados graúdos, que foram peneirados para uniformizar a composição granulométrica e ajustar a mesma dimensão máxima estabelecida. Os demais materiais foram apenas armazenados em locais apropriados, livre de umidade.

Quando necessário foi utilizado um aditivo superplastificante, em que os dados técnicos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados técnicos do aditivo superplastificante Plastoflow 7025

Característica	Plastoflow 7025
Base química	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	amarelado
Massa específica	~1,070 g/cm ³
pH	~4,5
Teor de cloretos	Não contém adição de cloretos

Fonte: Viapol, 2017.

Tanto para o agregado miúdo quanto para os graúdos foram realizados os ensaios de caracterização física. As Tabelas 3 e 4 apresentam a composição granulométrica dos agregados.

Tabela 3: Composição granulométrica: agregado miúdo.

Peneiras(mm)	Massa retida (kg)	% em massa	
		Retida	Acumulada
	Areia	Areia	Areia
1,18	0,150	3	3
600 µm	1,067	22	25
300 µm	2,760	55	80
150 µm	0,960	19	99
Fundo	0,063	1	100
TOTAL	5,000	100	207
Dimensão máxima característica			1,18 mm

Módulo de finura	2,07
------------------	------

Tabela 4: Composição granulométrica: agregados graúdos.

Peneiras (mm)	Massa retida (kg)	% em massa	
		Retida	Acumulada
	Agregado graúdo	Agregado graúdo	Agregado graúdo
19	0,280	2	2
12,5	7,160	48	50
9,5	5,840	39	89
6,3	1,580	10	99
4,75	0,049	0	99
2,36	0,014	0	99
1,18	-	0	99
600 µm	-	0	99
300 µm	-	0	99
150 µm	-	0	99
Fundo	0,076	1	100
TOTAL	15,000	100	685
Dimensão máxima característica			19 mm
Módulo de Finura			6,85

2.2 Parâmetros de dosagem dos concretos

Os parâmetros de dosagem dos concretos foram estabelecidos com base no método de dosagem proposto pelo IPT/EPUSP [30]. O valor de abatimento foi fixado em 100 ± 20 mm, medido de acordo com a NBR NM 67 [31]. Quando necessário fez-se o uso de aditivo superplastificante, isento de cloretos.

Como neste estudo foram utilizadas oito variações de agregados graúdos, variando em tipo e forma, determinou-se o volume de vazios de cada um deles e a partir do agregado com maior teor de vazios (granito), definiu-se o teor ótimo de argamassa em 54%, utilizado para todos os demais tipos de agregados. O teor de materiais secos (m) foi avaliado em três níveis: mais rico (m=4,5), intermediário (m=6) e mais pobre (m=7,5) de maneira a obter os parâmetros para o diagrama de dosagem. Definidos os diagramas de dosagem, determinaram-se os traços para as relações água/cimentos fixadas em 0,38, 0,48 e 0,58.

Posteriormente foi formulada uma grande matriz com as interações possíveis entre as variáveis selecionadas que poderiam influenciar significativamente o módulo de elasticidade do concreto, como: relação água/cimento, teor de pasta, módulo de elasticidade da rocha e forma do agregado, sendo produzidas em laboratório as misturas (Tabela 1).

2.3 Moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de prova

Para cada traço de concreto foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão axial e 4 corpos de prova cilíndricos para o ensaio de módulo de elasticidade estático. Todos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Fez-se o uso de uma betoneira de eixo inclinado para a produção dos concretos, conforme a NBR 5738 [32]. A betoneira foi sempre imprimada antes da preparação dos concretos. A ordem de colocação dos materiais foi sempre a mesma: inicialmente foi colocado 100% da brita, em seguida aproximadamente 30% da água e 100% de cimento, acrescentando o restante da água e 100% da areia. O aditivo superplastificante foi adicionado em conjunto com os 30% finais de água. As misturas foram realizadas por aproximadamente cinco (5) minutos a partir da colocação total da água.

Finalizados os procedimentos de moldagem, os corpos de prova ficaram armazenados à temperatura ambiente durante 24 horas, cobertos com lona plástica. Em seguida, foram desmoldados e colocados em re-

servatórios de água com cal e curados até completar os 28 dias de idade, com temperatura e umidade relativa do ar controladas, conforme prescreve a NBR 9479 [33].

Após o período de cura cada amostra foi retificada e submetida aos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático do concreto de acordo com a NBR 5739 [34] e NBR 8522 [35], respectivamente.

2.4 Ensaios realizados com o concreto

Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto realizaram-se três ciclos de carregamento e descarregamento dos corpos de prova conforme determinado na NBR 8522 [35] até o limite de 30% da resistência média à compressão do concreto. A deformação dos corpos de prova foi medida com dois transdutores de deslocamento indutivo (LVDT) integrados à prensa hidráulica com leitura esta transmitida diretamente para o software integrado da INSTRON, BlueHill 3.0. A base de medida das deformações foi de 100 mm.

2.5 Apresentação, tratamento e análise dos resultados

Os resultados obtidos por meio do programa experimental receberam tratamento estatístico com base na Análise de Variância (ANOVA), permitindo assim, a identificação das variáveis e interações que influenciaram significativamente no módulo de elasticidade. O nível de confiança adotado nas análises foi de 95%. Para a operação e apresentação dessas análises foram utilizados os recursos do software Statistica, versão 12.

3. RESULTADOS e DISCUSSÕES

3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto

Para permitir a observação da influência das variáveis teor de pasta, relação água/cimento (*a/c*), módulo de elasticidade da rocha e forma do agregado graúdo sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto, foram analisadas todas as variáveis para as rochas diabásio e basalto, que tiveram três formas diferentes de agregado graúdo, ou seja, beneficiamento VSI, intermediário e sem VSI. Para as rochas de calcário e granito analisou-se a interação das mesmas variáveis com exceção da forma do agregado graúdo.

Os resultados médios obtidos tanto para as misturas com rocha de diabásio quanto de basalto estão apresentadas na Tabela 5. Os resultados para as rochas de calcários e granito são apresentados na Tabela 6.

Tabela 5: Resultados médios da Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade do concreto com as rochas de diabásio e basalto

Beneficiamento	Traço	Resistência Média (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Módulo Médio (GPa)	Coefficiente de Variação (%)	Teor de aditivo (%)
Com VSI	D25 - m4,5	37,7	1,16	39,0	0,77	0,00
	D35 - m4,5	50,9	0,49	42,1	1,04	0,18
	D45 - m4,5	59,2	0,93	43,1	0,94	0,20
Intermediário	D25 - m4,5	34,3	1,32	40,4	1,45	0,00
	D35 - m4,5	46,8	0,98	42,4	1,08	0,20
	D45 - m4,5	56,9	0,79	44,1	1,1	0,35
Sem VSI	D25 - m4,5	33,9	1,63	41,9	1,41	0,20
	D35 - m4,5	45,1	0,56	42,8	1,13	0,40
	D45 - m4,5	54,3	0,65	43,9	1,27	0,61
Com VSI	D25 - m6	34,3	1,31	44,6	0,96	0,00
	D35 - m6	45,6	0,91	46,6	0,95	0,32
	D45 - m6	56,8	0,97	47,2	0,63	0,64
Intermediário	D25 - m6	32,3	1,76	43,7	0,78	0,20

	D35 - m6	44,0	0,60	45,0	0,84	0,36
	D45 - m6	53,4	0,57	46,0	1,19	0,74
Sem VSI	D25 - m6	31,9	0,48	42,3	0,92	0,46
	D35 - m6	42,7	1,30	44,6	1,03	0,55
	D45 - m6	52,7	1,14	45,9	1,34	1,20
Com VSI	D25 - m7,5	31,7	1,27	45,9	1,10	0,00
	D35 - m7,5	43,6	1,15	48,1	0,71	0,54
	D45 - m7,5	53,7	1,12	50,7	0,97	1,10
Intermediário	D25 - m7,5	30,9	0,97	43,9	1,45	0,75
	D35 - m7,5	41,0	0,88	46,2	1,15	0,95
	D45 - m7,5	51,8	0,87	48,5	0,89	1,30
Sem VSI	D25 - m7,5	30,8	0,82	43,2	0,97	0,84
	D35 - m7,5	40,5	0,99	47,4	1,20	1,10
	D45 - m7,5	49,8	0,95	48,6	0,84	1,45
Com VSI	B25 - m4,5	38,2	1,20	40,0	1,29	0,00
	B35 - m4,5	48,5	0,74	43,3	1,10	0,20
	B45 - m4,5	59,9	0,33	44,7	1,12	0,30
Intermediário	B25 - m4,5	37,2	1,12	40,3	1,34	0,00
	B35 - m4,5	45,8	1,42	42,7	1,01	0,25
	B45 - m4,5	55,5	0,73	44,4	0,99	0,32
Sem VSI	B25 - m4,5	33,0	2,29	39,6	0,99	0,40
	B35 - m4,5	44,2	1,04	42,6	1,07	0,74
	B45 - m4,5	54,0	1,30	42,9	1,21	0,82
Com VSI	B25 - m6	35,7	1,56	42,2	0,83	0,02
	B35 - m6	44,9	0,68	45,6	0,93	0,18
	B45 - m6	57,2	0,80	47,0	1,02	0,80
Intermediário	B25 - m6	35,6	1,56	42,8	1,04	0,20
	B35 - m6	43,6	1,26	45,0	1,67	0,30
	B45 - m6	53,5	1,10	46,4	1,19	1,20
Sem VSI	B25 - m6	32,2	1,87	40,9	1,36	0,27
	B35 - m6	42,1	0,83	44,0	1,61	0,38
	B45 - m6	53,1	1,05	45,0	1,02	1,25
Com VSI	B25 - m7,5	33,4	1,25	44,7	0,93	0,10
	B35 - m7,5	43,0	0,71	46,2	0,88	0,62
	B45 - m7,5	54,7	0,73	48,7	0,83	0,95
Intermediário	B25 - m7,5	32,8	1,99	45,0	1,46	0,55
	B35 - m7,5	41,9	0,73	46,0	1,26	0,84
	B45 - m7,5	51,6	0,68	48,0	1,41	1,40
Sem VSI	B25 - m7,5	30,8	0,82	43,1	1,67	0,70
	B35 - m7,5	39,9	1,01	45,1	1,14	0,97
	B45 - m7,5	50,2	0,70	46,6	1,03	1,50

Tabela 6: Resultados médios da Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade do concreto com as rochas de calcário e granito

Beneficiamento	Traço	Resistência Média (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Módulo Médio (GPa)	Coefficiente de Variação (%)	Teor de aditivo (%)
Sem VSI	C25 - m4,5	34,2	1,32	32,6	1,36	0,20
	C35 - m4,5	44,9	1,48	34,7	1,28	0,40
	C45 - m4,5	53,6	0,88	36,0	0,86	0,48
	C25 - m6	32,3	1,09	36,1	1,12	0,20
	C35 - m6	42,5	0,83	38,2	0,87	0,40
	C45 - m6	51,7	1,17	39,9	1,20	1,20
	C25 - m7,5	30,2	1,32	37,1	1,05	0,25
	C35 - m7,5	39,5	1,65	38,8	1,37	0,66
	C45 - m7,5	48,8	1,34	42,4	1,93	1,60
	G25 - m4,5	33,3	1,36	32,0	1,63	0,15
	G35 - m4,5	43,1	1,10	33,6	1,42	0,33
	G45 - m4,5	53,0	1,26	35,6	1,66	0,45
	G25 - m6	31,8	0,96	34,2	2,26	0,18
	G35 - m6	40,9	1,47	36,9	1,64	0,34
	G45 - m6	50,2	1,33	38,2	0,99	0,90
	G25 - m7,5	29,9	1,86	37,0	1,34	0,25
G35 - m7,5	38,9	1,81	39,9	1,41	0,45	
G45 - m7,5	48,1	0,94	41,6	1,39	1,30	

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas as análises de variâncias (ANOVA) em relação ao módulo de elasticidade do concreto para as rochas de diabásio e basalto e para as rochas de calcário e granito, respectivamente. Em vermelho foram indicados os parâmetros estatisticamente significantes ($p \leq 0,05$).

Tabela 7: ANOVA: módulo de elasticidade do concreto - rochas de diabásio e basalto.

Parâmetros	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor "p"	Significância
A: Teor de Pasta	640,5	2	320,3	1286,9	0,000000	S
B: Relação água/cimento (a/c)	523,8	2	261,9	1052,5	0,000000	S
C: Forma do agregado graúdo	40,2	2	20,1	80,7	0,000000	S
D: E_c da Rocha	17,6	1	17,6	70,6	0,000000	S
AxB	6,9	4	1,7	7,0	0,000033	S
AxC	33,4	4	8,4	33,6	0,000000	S
BxC	5,8	4	1,5	5,9	0,000195	S
AxD	11,8	2	5,9	23,7	0,000000	S
BxD	0,6	2	0,3	1,2	0,313673	NS
CxD	13,3	2	6,7	26,8	0,000000	S
AxBxC	11,3	8	1,4	5,7	0,000002	S
AxBxD	15,9	4	4,0	16,0	0,000000	S
AxCxD	19,7	4	4,9	19,8	0,000000	S
BxCxD	0,9	4	0,2	0,9	0,439180	NS
Erro	40,3	162	0,2			

Tabela 8: ANOVA: módulo de elasticidade do concreto - rochas de calcário e granito.

Parâmetros	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor "p"	Significância
A: Teor de Pasta	355,31	2	177,66	646,9	0,000000	S
B: Relação água/cimento (a/c)	204,57	2	102,28	372,4	0,000000	S
C: E _c da Rocha	9,83	1	9,83	35,8	0,000000	S
AxB	5,33	4	1,33	4,9	0,002045	S
AxC	9,14	2	4,57	16,6	0,000002	S
BxC	1,07	2	0,54	2,0	0,151290	NS
AxBxC	3,25	4	0,81	3,0	0,027828	S
Erro	14,83	54	0,27			

Conforme a Tabela 7 pode-se afirmar que todas as variáveis analisadas se apresentaram significativas para o módulo de elasticidade do concreto, exceto a interação de segunda ordem entre relação água/cimento (a/c) e o módulo de elasticidade (E_c) da rocha e a interação de terceira ordem entre relação água/cimento (a/c), a forma do agregado graúdo e o E_c da rocha, que se mostraram não significativas estatisticamente para o módulo de elasticidade do concreto.

A variável de maior significância para o módulo de elasticidade foi o teor de pasta, seguido da relação água/cimento, da forma do agregado graúdo e, por fim, do tipo de rocha.

A Tabela 8 permite afirmar que todas as variáveis e suas interações apresentam significância estatística sobre o módulo de elasticidade do concreto quando do uso de agregados graúdos de calcário e granito, exceto a interação de segunda ordem entre o teor de pasta e o E_c da Rocha, que se mostrou não significativo.

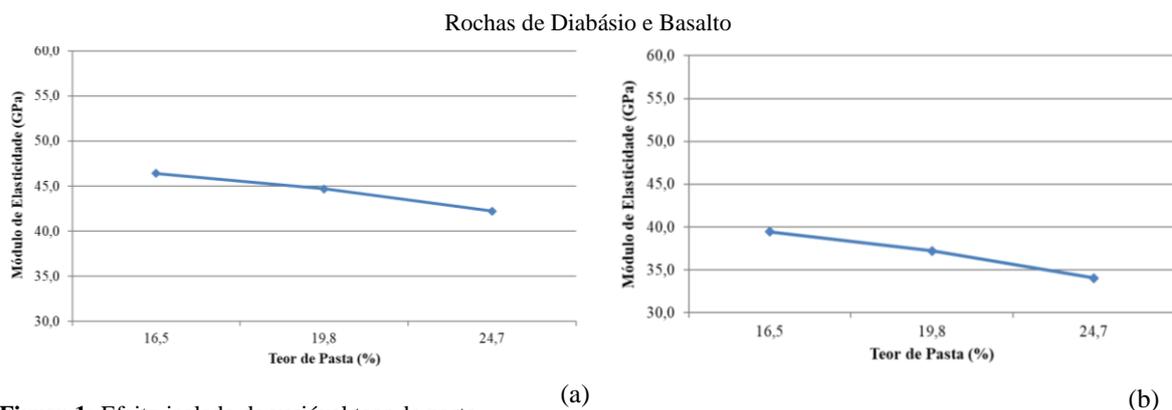
Assim como para as rochas de diabásio e basalto, a variável de maior significância é o teor de pasta, seguido da relação água/cimento e do tipo de rocha.

3.2 Efeito isolado das variáveis

Na sequência são apresentados os efeitos isolados de cada uma das variáveis sobre o módulo de elasticidade do concreto.

3.2.1 Efeito isolado da variável teor de pasta

Na Figuras 1 apresenta-se o efeito isolado da variável teor de pasta sobre o módulo de elasticidade do concreto para rochas de basalto e diabásio (a) e calcário e granito (b).


Figura 1: Efeito isolado da variável teor de pasta

Percebe-se que o aumento do teor de pasta resulta na diminuição do módulo de elasticidade do concreto, o que ocorre com maior intensidade para as rochas de calcário e granito. Na Figura 1 (a), quando se aumentou o teor de pasta de 16,5% para 19,8%, a redução no módulo foi de 3,66%, e quando se elevou ainda mais o teor de pasta, passando de 19,8% para 24,7%, a redução no módulo foi de 5,59%. Para os concretos produzidos com rochas de calcário e granito, Figura 1 (b), o aumento no teor de pasta de 16,5% para 19,8% ocasionou uma redução no módulo de 5,82%, já quando se elevou ainda mais o teor de pasta de 19,8% para 24,7%, a redução foi de 8,60%. Dessa forma, é possível associar a elevação do valor do módulo de elasticidade ao

aumento da quantidade do componente de maior rigidez (agregado graúdo), pois quando se reduziu o teor de pasta, consequentemente, se aumentou o teor de agregado graúdo na mistura, sendo que as proporções cimento:agregados foram de 1:4,5 (volume de pasta 24,7%), 1:6 (volume de pasta 19,8%) e 1:7,5 (volume de pasta 16,5%).

GIRARDI *et al.* [25] obtiveram conclusões semelhantes, em que a redução do volume de pasta provocou um crescimento no valor do módulo de elasticidade, pois com a redução do volume de pasta de 50,2% para 22,3%, nos traços 1:2 e 1:7, respectivamente, houve alteração no valor do módulo de elasticidade de 33,5% aos 28 dias. Outros autores também já evidenciaram esse comportamento, como HAECKER *et al.* [36], BAUER, PEREIRA e LEAL [37], XIE *et al.* [38], BILESKY [39].

3.2.2 Efeito isolado da variável relação água/cimento

A Figura 2 permite afirmar que o módulo de elasticidade do concreto diminuiu com o aumento da relação água/cimento (a/c), pois com relações a/c menores tem-se um menor afastamento dos grãos de aglomerante, menos água livre, menor porosidade da matriz e zona de transição menor, consequentemente haverá um espaço menor para o crescimento de cristais de hidróxido de cálcio.

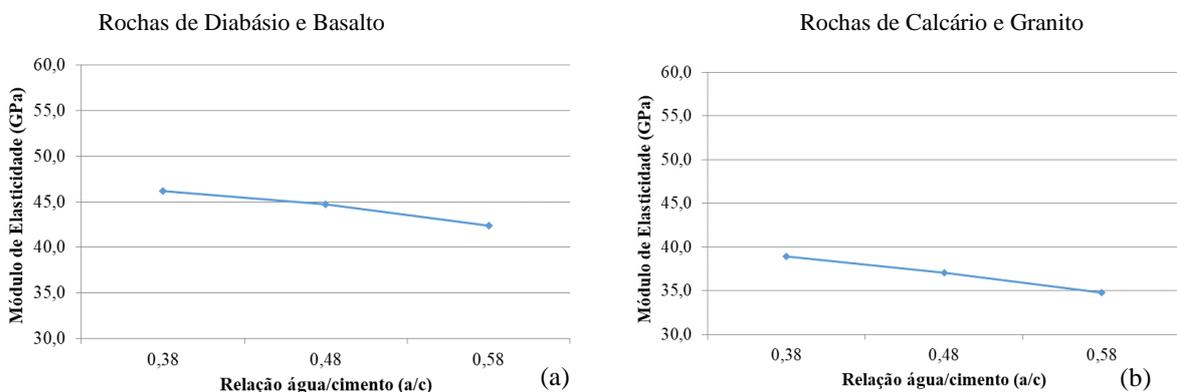


Figura 2: Efeito isolado da variável relação água/cimento

Para os concretos produzidos com rochas de diabásio e basalto, Figura 2 (a), a queda no valor do módulo quando se elevou a relação a/c de 0,38 para 0,48 foi de 3,25%, e quando a relação a/c passou de 0,48 para 0,58 a redução foi ainda maior, 5,15%. Comportamento semelhante verifica-se com as rochas de calcário e granito, Figura 2 (b), porém com maior intensidade, em que o aumento da relação a/c de 0,38 para 0,48 ocasionou uma queda no módulo de elasticidade de 4,88% e, 5,95% quando aumentou-se a relação a/c de 0,48 para 0,58. O comportamento evidenciado por este estudo também foi confirmado em pesquisas realizadas por SILVA [40], HAECKER *et al.* [36], ROHDEN [41], BILESKY [39], entre outros.

3.2.3 Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo

A variável forma somente foi analisada com as rochas de diabásio e basalto, devido aos tipos de beneficiamentos adotados pelas pedreiras. A Figura 3 permite inferir que à medida que o índice de forma do agregado graúdo aumenta, o módulo de elasticidade do concreto diminui. Quando se aumentou o índice de forma de 1,58 para 2,02 a redução do módulo foi de 1,11%, já quando o índice de forma passou de 2,02 para 2,50, a queda no valor do módulo foi cerca de 1,35%. Essas reduções ocasionadas no valor do módulo de elasticidade do concreto podem ser explicadas pelas partículas lamelares que acabam prejudicando o empacotamento, criando vazios, e assim afetando de maneira direta na capacidade de deformação do concreto.

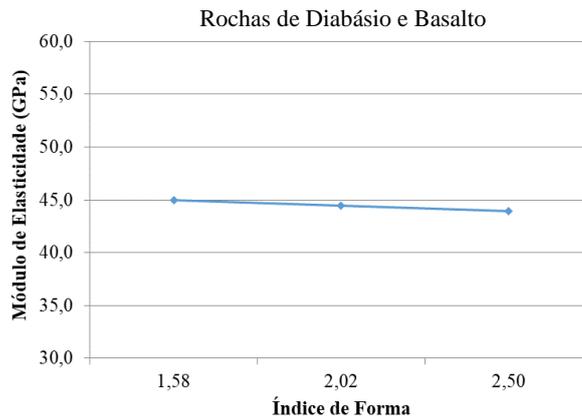


Figura 3: Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo

Foram encontrados na literatura poucos estudos referentes a influência da forma do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto, entre eles tem-se pesquisas de OLIVEIRA *et al.* [42]; MENDES [43]; SILVA *et al.* [44]; HICKEL *et al.* [45]. Os resultados desses estudos são semelhantes aos obtidos por esta pesquisa.

3.2.4 Efeito isolado da variável E_c da rocha

Na Figura 4 observa-se o efeito isolado da influência do módulo de elasticidade da rocha (E_c) no módulo de elasticidade do concreto.

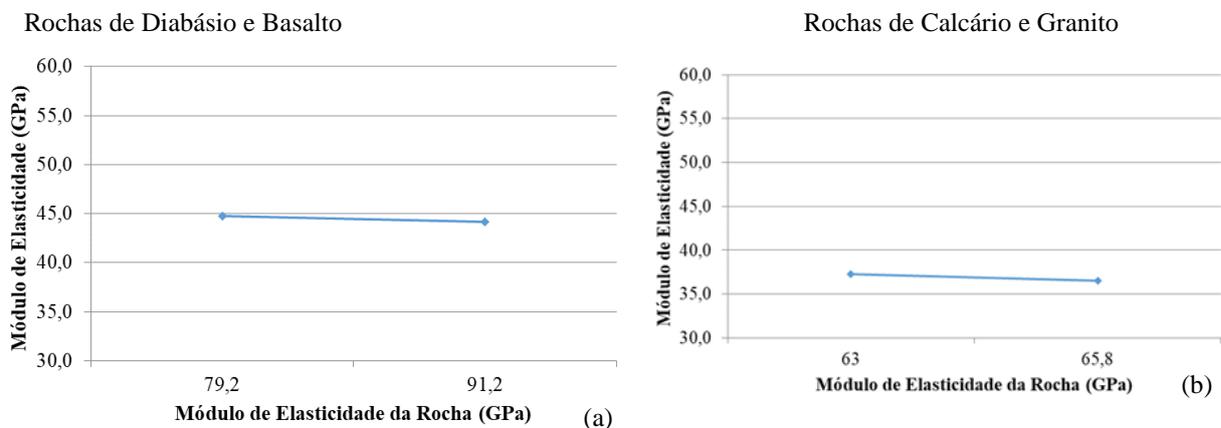


Figura 4: Efeito isolado da variável módulo de elasticidade da rocha

Verifica-se que apesar de estatisticamente a variável se apresentar significativa, as alterações nos resultados para rochas de diabásio (E_c de 79,2 GPa e f_c de 174,9 MPa) e basalto (E_c de 91,2 GPa e f_c de 108,3 MPa), Figura 4 (a), são muito pequenas, em que a variação foi de 1,11%. Já quando se observa a Figura 4 (b) para concretos com rochas de calcário (E_c de 63,0 GPa e f_c de 80,2 MPa) e granito (E_c de 65,8 GPa e f_c de 87,7 MPa), verificam-se alterações nos resultados médios do módulo de elasticidade do concreto com a variação do tipo de rocha de 2,14%.

Pesquisas realizadas por RASHID *et al.* [46]; ALHADAS [47]; NETO *et al.* [48]; UYSAL [49]; BEUSHAUSEN e DITTMER [21]; BILESKY [39]; SANTOS *et al.* [50]; TIBBETTS *et al.* [24] e entre outras, demonstraram que a rigidez do agregado tem um impacto direto no módulo de elasticidade do concreto. Ainda, as pesquisas de BESHAR *et al.* [51] e UYSAL [49] também confirmam as diferenças significativas entre os valores de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos e relação a/c constante, em que o módulo de elasticidade do concreto aumentou em decorrência da elevação da resistência e do módulo do agregado. Alguns autores afirmam que agregados mais rígidos tendem a fornecer concretos mais rígidos ao obterem valores maiores para o módulo de elasticidade na flexão em con-

cretos contendo agregados graúdos de basalto e de andesito (mais rígidos) em relação aos módulos dos concretos contendo agregados de granito [52]. Confirmando a suposição de AÍTCIN e MEHTA [2] em relação a dependência do módulo de elasticidade do concreto e as propriedades dos seus materiais constituintes.

3.3 Previsão do Módulo de Elasticidade – ABNT NBR 6118/2014

No Brasil, a norma que estabelece a equação para o módulo de elasticidade e de deformação do concreto é a NBR 6118 [53]. As equações para previsão do módulo de elasticidade nas versões da NBR 6118 de 1978, 2003 e 2007 baseavam-se somente na resistência à compressão axial do concreto, porém na mais recente atualização, em 2014, passou-se a considerar na equação não somente a resistência, mas também o tipo de agregado graúdo utilizado na mistura de concreto. Na Tabela 9 é possível comparar o valor estimado do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão e tipo de agregado graúdo com o módulo de elasticidade obtido experimentalmente.

Tabela 9: Módulo de Elasticidade Estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e Modulo de Elasticidade Experimental

Beneficiamento	Traço	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade Experimental (GPa)	Módulo de Elasticidade Estimado - NBR 6118/2014 (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
Com VSI	D25 - m4,5	37,7	39,0	41,3	3,98
	D35 - m4,5	50,9	42,1	47,9	9,18
	D45 - m4,5	59,2	43,1	51,7	12,84
Intermediário	D25 - m4,5	34,3	40,4	39,4	1,85
	D35 - m4,5	46,8	42,4	46,0	5,72
	D45 - m4,5	56,9	44,1	50,7	9,83
Sem VSI	D25 - m4,5	33,9	41,9	39,1	4,84
	D35 - m4,5	45,1	42,8	45,1	3,75
	D45 - m4,5	54,3	43,9	49,5	8,51
Com VSI	D25 - m6	34,3	44,6	39,4	8,83
	D35 - m6	45,6	46,6	45,4	1,88
	D45 - m6	56,8	47,2	50,6	4,98
Intermediário	D25 - m6	32,3	43,7	38,2	9,51
	D35 - m6	44,0	45,0	44,6	0,67
	D45 - m6	53,4	46,0	49,1	4,62
Sem VSI	D25 - m6	31,9	42,3	38,0	7,66
	D35 - m6	42,7	44,6	43,9	1,10
	D45 - m6	52,7	45,9	48,8	4,31
Com VSI	D25 - m7,5	31,7	45,9	37,8	13,62
	D35 - m7,5	43,6	48,1	44,4	5,70
	D45 - m7,5	53,7	50,7	49,2	2,06
Intermediário	D25 - m7,5	30,9	43,9	37,4	11,39
	D35 - m7,5	41,0	46,2	43,0	5,03
	D45 - m7,5	51,8	48,5	48,4	0,20
Sem VSI	D25 - m7,5	30,8	43,2	37,3	10,38
	D35 - m7,5	40,5	47,4	42,8	7,27
	D45 - m7,5	49,8	48,6	47,4	1,73
Com VSI	B25 - m4,5	38,2	40,0	41,5	2,66
	B35 - m4,5	48,5	43,3	46,8	5,49
	B45 - m4,5	59,9	44,7	52,0	10,69

Intermediário	B25 - m4,5	37,2	40,3	41,0	1,19
	B35 - m4,5	45,8	42,7	45,5	4,46
	B45 - m4,5	55,5	44,4	50,1	8,48
Sem VSI	B25 - m4,5	33,0	39,6	38,6	1,80
	B35 - m4,5	44,2	42,6	44,7	3,36
	B45 - m4,5	54,0	42,9	49,4	9,93
Com VSI	B25 - m6	35,7	42,2	40,2	3,52
	B35 - m6	44,9	45,6	45,0	0,89
	B45 - m6	57,2	47,0	50,8	5,53
Intermediário	B25 - m6	35,6	42,8	40,1	4,61
	B35 - m6	43,6	45,0	44,4	0,99
	B45 - m6	53,5	46,4	49,2	4,07
Sem VSI	B25 - m6	32,2	40,9	38,1	4,95
	B35 - m6	42,1	44,0	43,6	0,64
	B45 - m6	53,1	45,0	49,0	5,97
Com VSI	B25 - m7,5	33,4	44,7	38,8	9,93
	B35 - m7,5	43,0	46,2	44,1	3,34
	B45 - m7,5	54,7	48,7	49,7	1,44
Intermediário	B25 - m7,5	32,8	45,0	38,5	11,03
	B35 - m7,5	41,9	46,0	43,5	3,95
	B45 - m7,5	51,6	48,0	48,3	0,40
Sem VSI	B25 - m7,5	30,8	43,1	37,3	10,21
	B35 - m7,5	39,9	45,1	42,4	4,28
	B45 - m7,5	50,2	46,6	47,6	1,52
Sem VSI	C25 - m4,5	34,2	32,6	29,5	7,12
	C35 - m4,5	44,9	34,7	33,8	1,92
	C45 - m4,5	53,6	36,0	36,9	1,74
	C25 - m6	32,3	36,1	28,6	16,29
	C35 - m6	42,5	38,2	32,9	10,63
	C45 - m6	51,7	39,9	36,2	6,80
	C25 - m7,5	30,2	37,1	27,7	20,52
	C35 - m7,5	39,5	38,8	31,7	14,30
	C45 - m7,5	48,8	42,4	35,2	13,11
	G25 - m4,5	33,3	32,0	32,3	0,69
	G35 - m4,5	43,1	33,6	36,8	6,36
	G45 - m4,5	53,0	35,6	40,8	9,57
	G25 - m6	31,8	34,2	31,6	5,63
	G35 - m6	40,9	36,9	35,8	2,11
	G45 - m6	50,2	38,2	39,7	2,68
	G25 - m7,5	29,9	37,0	30,6	13,34
	G35 - m7,5	38,9	39,9	34,9	9,40
	G45 - m7,5	48,1	41,6	38,8	4,86

Conforme a Tabela 9 percebe-se a divergência que ocorre entre o módulo de elasticidade estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e o módulo obtido experimentalmente. Apesar de a NBR 6118 [53] apresentar duas equações para determinar o módulo, diferenciando-as pela classe de resistência do concreto, e conside-

rar o tipo de agregado graúdo utilizado na mistura, existem pesquisas (ARAÚJO [54]; AGUILAR *et al.* [55]; ARRUDA [56]; SANTOS *et al.* [57]; ALHADAS [47]; GIRARDI [25], entre outras) que apontam divergências entre os resultados obtidos por meio dessas equações e os resultados obtidos experimentalmente.

4. CONCLUSÕES

A maioria dos estudos já realizados não levam em consideração a influência conjunta de todas as variáveis que influenciam no valor do módulo de elasticidade do concreto, resultando em modelos de previsão do módulo de elasticidade do concreto não representativos dos valores experimentais, comprometendo a aplicabilidade dos mesmos com maior confiabilidade, entre estes modelos tem-se o modelo indicado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). A partir das variáveis estudadas e dos valores obtidos, em um estudo posterior será possível propor um modelo de previsão para estimar o módulo de elasticidade do concreto.

As conclusões são referentes às influências das diferentes variáveis estudadas sobre o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland, analisadas para cada uma das rochas selecionadas. As referidas conclusões foram:

- a) quanto menor o teor de pasta maior tende a ser o módulo de elasticidade do concreto, para todas as rochas estudadas, isso ocorre porque o agregado graúdo tem módulo maior que a argamassa;
- b) o módulo de elasticidade do concreto diminui com o aumento da relação água/cimento;
- c) a forma do agregado graúdo apresenta influência sobre o módulo de elasticidade do concreto, quanto menor o índice de forma do agregado graúdo maior tende a ser o módulo de elasticidade do concreto;
- d) o módulo de elasticidade do concreto é influenciado pelas propriedades mecânicas do agregado graúdo;
- e) Para a propriedade módulo de elasticidade do concreto com as rochas basalto e diabásio, a variável de maior influência foi o teor de pasta, seguida pela relação a/c, forma do agregado graúdo e E_c da rocha;
- f) para os concretos produzidos com agregados de calcário e granito a variável de maior influência para o módulo de elasticidade do concreto é o teor de pasta, seguida pela relação a/c e E_c da rocha;
- g) indiferentemente do tipo de rocha estudada, a maioria das interações das variáveis se mostraram estatisticamente significativas para a propriedade do concreto (módulo de elasticidade), mas no âmbito prático não apresentam grande influência, pois o teste F mostra menor impacto que as variáveis principais;
- h) O modelo de previsão do módulo apresentado pela NBR 6118 não representa adequadamente os resultados experimentais, necessitando de estudos para auxiliar em sua readequação para que possa ser aplicada com maior confiabilidade.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] METHA, P., MONTEIRO, P. Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais. 4º edição, Ed Ibracon. 2014.
- [2] AITCIN, P.C., METHA, P.K., "Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete", *ACI Materials Journal*, v. 87, n. 2, pp. 103-107, March-April, 1990.
- [3] VOIGT, W. Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen der Physik*, v. 274, n. 12, p. 573-587, 1889.
- [4] REUSS, A. (1929) 'Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen aufgrund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle', *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* 9, pp. 49-58.
- [5] JANOWSKI, K.R., ROSSI, R.C. Elastic behavior of MgO matrix composites. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 50, n. 11, p. 599-603, 1967.
- [6] YILDIRIM, H., SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 4, p. 1645-1652, 2011.
- [7] NEVILLE, A.M. *Properties of Concrete*. 5th ed. England: Pearson, 2011.
- [8] ASLANI, F., NEJADI, S., "Mechanical Properties of Conventional and Self-Compacting Concrete: An Analytical Study," doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.034. *Construction and Building Materials*, v. 36, pp. 330-347. 2012
- [9] KOCKAL, N., "Validity and Reliability of Estimated Modulus of Elasticity of Cementitious Materials," *IOP Conference Series*. doi:10.1088/1757-899X/103/1/012024. *Materials Science and Engineering*, v. 103, p. 012024, 2015.
- [10] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI,

2014, 519 pp.

- [11] ZHOU, Y., GAO, J., SUN, Z., *et al.*, A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.110. Construction and Building Materials, v. 98, pp. 137-145, 2015
- [12] BILIR, T., “Investigation of Performances of Some Empirical and Composite Models for Predicting the Modulus of Elasticity of High Strength Concretes Incorporating Ground Pumice and Silica Fume,”. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.054. Construction and Building Materials, v. 127, pp. 850-860. 2016
- [13] LEAL, C.E.F., PARSEKIAN, G.A., FERREIRA, F.G.D.S., *et al.*. Comparação entre módulos de deformação de concretos nacionais produzidos com agregados graúdos de diferentes origens mineralógicas. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.
- [14] SOUZA, P.S.L., DAL MOLIN, D.C.C., PICANÇO, M.S., *et al.*, “Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial”, Revista Matéria, v. 20, n. 4, pp. 982-991, 2015.
- [15] LI, G., ZHAO, Y., PANG, S.S., *et al.*. Effective Young's modulus estimation of concrete. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 9, pp. 1455-1462, 1999.
- [16] JOHARI, M.M., BROOKS, J.J., KABIR, S., *et al.*. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. Construction and Building Materials, v. 25, n. 5, pp. 2639-2648, 2011.
- [17] SHARIQ, M., PRASAD, J., ABBAS, H. Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete. Construction and Building Materials, v. 41, p. 411-418, 2013.
- [18] LIU, B., LV, W., LI, L., *et al.*, Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete, Construction and Building Materials. V. 69, PP. 133-142, 2014.
- [19] CRAEYE, B., *et al.* Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes. Cement and Concrete Composites, v. 54, p. 53-61, 2014.
- [20] JUROWSKI, K., GRZESZCZYK, S. The influence of concrete composition on Young's modulus. Procedia Engineering, v. 108, pP. 584-591, 2015.
- [21] BEUSHAUSEN, H., DITTMER, T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. Construction and Building Materials, v. 74, p. 132-139, 2015.
- [22] YANG, H., RAO, M., DONG, Y. Influence study of extra-large stone limited size and content on full-graded concrete properties. Construction and Building Materials, v. 127, p. 774-783, 2016.
- [23] PIASTA, W., GORA, J., BUDZYŃSKI, W. Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. Construction and Building Materials, v. 153, p. 728-739, 2017.
- [24] TIBBETTS, C.M., *et al.* Aggregate Correction Factors for Concrete Elastic Modulus Prediction. ACI Structural Journal, v. 115, n. 4, Pp. 931-941, 2018.
- [25] GIRARDI, R., MOLIN, D.C.Dal, RECENA, F.A.P. Portland Cement Concrete Deformation Modulus: Influence of Paste Volume. ACI Materials Journal, v. 117, n. 1, 2020.
- [26] SOUZA, P.S.L., *et al.* Assessment of the modulus of elasticity in concrete with high reactivity metakaolin from industry. Matéria (Rio de Janeiro), v. 20, n. 4, p. 982-991, 2015.
- [27] KLEIN, N.S., LENZ, L.A., MAZER, W. Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. Construction and Building Materials, v. 242, p. 118086, 2020.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697:Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- [29] _____. NBR 10341:Agregado graúdo para concreto -Determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz -Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.
- [30] HELENE, P.R.L., TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. Pini, 1992.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [32] _____. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2016.
- [33] _____.NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.
- [34] _____. NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- [35] _____.NBR 8522: Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- [36] HAECKER, C.J., *et al.* Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste. Disponível em: <http://ciks.cbt.nist.gov/~garboz/paper148/index.html>. Acesso em 10 de agosto de 2020.

- [37] BAUER, E., PEREIRA, C.H.A.F., LEAL, A.C.F.S. Valores do módulo de elasticidade de concretos comercial da região do Distrito Federal. XIV ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora/MG, 2012.
- [38] XIE, Y., CORR, D.J., JIN, F., *et al.* Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC). *Cement & Concrete Composites*.v. 55, pp. 223- 31, 2015.
- [39] BILESKY, P.C. Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo. 137 fls. São Paulo/SP, 2016.
- [40] SILVA, K.J.D. Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos com um ano de idade, produzidos com diferentes agregados graúdos. Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológico de Goiás. Goiânia/GO, 2003.
- [41] ROHDEN, A., BRESCOVIT, A., KIRCHHEIM, A., *et al.* (2011). Efeito do teor de agregado graúdo na resistência à tração do concreto de alto desempenho. In ANAIS DO 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.
- [42] OLIVEIRA, I.R., STUDART, A.R., PILEGGI, R.G., *et al.* Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.
- [43] MENDES, T.M. Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas. 2008. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [44] SILVA, R.V., DE BRITO, J., DHIR, R.K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of cleaner production*, v. 112, p. 2171-2186, 2016.
- [45] HICKEL, G.C., BOAVENTURA, G.C., SOUZA, R.A.D., *et al.* Influência do tipo de britador na forma dos grãos de agregados miúdos de britagem. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 4, pp. 902-930, 2018.
- [46] RASHID, M.A., MANSUR, M.A., ASCE, M., *et al.* Correlations between mechanical properties of high-strength concrete. *J Mater Civ Eng* 2002;14:230–8.
- [47] ALHADAS, M.F.S. Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. 126 fls. Belo Horizonte/MG, 2008.
- [48] MELO NETO, A.A., HELENE, P.R.L. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44º, Belo Horizonte. 2002.
- [49] UYSAL, M. The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 533– 540.
- [50] SANTOS, A.C., *et al.* Comparative study between theoretical values and experimental results of concrete elasticity modulus produced with different types of coarse aggregate. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 3, p. 281-294, 2017.
- [51] BESH, H., ALMUSALLAM, A.A., MASLEHUDDIN, M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and building materials*, v. 17, n. 2, p. 97-103, 2003.
- [52] NETO, B.B.P, OLIVEIRA, D.R.C, RAMOS, D., “Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência”, *Revista Matéria*, v. 16, n. 2, pp. 690-702, 2011.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [54] ARAÚJO, J.M. Modelos de previsão do módulo de deformação longitudinal do concreto: NBR 6118 *versus* CEB. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n. 12, 2008.
- [55] AGUILAR, M.T.P., *et al.* Análise da capacidade de deformação do concreto: Módulo de Young x Módulo de Deformação. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu/PR, p. 3672 - 3684, 2006.
- [56] ARRUDA, A.M.D. Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. 166 fls. Uberlândia/MG, 2013.
- [57] SANTOS, A.C., *et al.* Comparative study between theoretical values and experimental results of concrete elasticity modulus produced with different types of coarse aggregate. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 3, p. 281-294, 2017.



ORCID

Cristiane Carine dos Santos

<https://orcid.org/0000-0002-0988-2682>

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

<https://orcid.org/0000-0003-1934-7533>

Geraldo Cechella Isaia

<https://orcid.org/0000-0003-0653-1227>

João Ricardo Masuero

<https://orcid.org/0000-0001-9733-8881>

André Lübeck

<https://orcid.org/0000-0001-5772-9933>