

Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência

B.B.P. Neto; D.R.C. Oliveira; D. Ramos

Laboratório de Engenharia Civil da UFPA – Rua Augusto Corrêa, número 01. 66075-970, Belém, PA.
e-mail: pompeu@ufpa.br ; denio@ufpa.br ; engcivildanielleramos@hotmail.com

RESUMO

O concreto, material de composição heterogênea e complexa, é o principal insumo em construções. Do ponto de vista estrutural, ele tem como propriedade principal sua resistência. O estudo do comportamento do concreto, baseado em estudos conceituais da resistência granular, pode conduzir a um projeto estrutural mais seguro e de melhor utilização do material. Este trabalho expõe os resultados de um estudo conduzido para avaliar os efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. A mistura de concreto estudada contém agregados de basalto e de granito com dimensões máximas características de 9,5 mm e 19 mm e relação água/cimento de 0,35. O módulo de elasticidade do material foi determinado usando o trecho inicial linear da curva Carga-*CMOD* (deslocamento de abertura da boca da fissura) no ensaio de flexão com três pontos em viga entalhada no meio do vão, seguindo a proposta do comitê técnico 89-FMT da RILEM (*Internacional Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures*).

Palavras-chave: Concreto, agregado, módulo de deformação.

Effects of type, size and content of coarse aggregates on the modulus of deformation of high strength concretes

ABSTRACT

Concrete, material with heterogeneous and complex composition, is the main structural material applied in the construction industry. From the structural point of view its main property is the mechanical strength. The behavior of concrete based on conceptual studies of granular resistance can lead to a safer structural design and better use of the material. This paper presents the results of a study conducted to evaluate the effects of type, size and content of coarse aggregates on the modulus of deformation of high strength concretes. The concrete mixture studied contains basalt or granite aggregates with maximum dimensions of 9.5 mm and 19.0 mm and water/cement ratio of 0.35. The deformation modulus of the material was determined using the linear length of Load-*CMOD* curve (displacement of the crack mouth opening) from three point bending tests performed using a middle span cracked beam, following the propositions made by the RILEM 89-FMT technical committee.

Keywords: Concrete, aggregate, modulus of deformation.

1 INTRODUÇÃO

Os agregados devem ser adaptados a certas normas para um uso otimizado em engenharia: limpos, duros, resistentes, duráveis, com partículas livres de substâncias ou camadas de argilas e livres e outros materiais finos em quantidades que poderiam afetar a hidratação e a ligação com a pasta de cimento. De acordo com GIACCIO *et al.* [13], as propriedades do concreto dependem das propriedades de seus componentes (matriz da pasta e agregados e das interações entre eles), a diferença de dureza entre os agregados e a matriz da pasta produz concentração de tensões nas interfaces que pode diferir das tensões do material, com a possibilidade de ocorrer formações de fissuras no concreto, nas argamassas e nas partículas dos agregados, sendo esses efeitos intensificados com o aumento do tamanho do agregados, especialmente quando esse valor for maior do que 5 mm (agregado graúdo). ZHOU *et al.* [18], estudando o efeito de diferentes tipos de agregados graúdos no módulo de elasticidade e na resistência à compressão do concreto de alto desempenho, concluíram que o tipo do agregado influencia tanto no módulo como na resistência do

concreto; eles observaram, também, que quanto mais poroso o agregado maior a redução na resistência do concreto.

AITCIN e METHA [1] investigando a influência de quatro diferentes tipos de agregados graúdos na resistência à compressão e no comportamento elástico de misturas de concreto de alta-resistência ($a/c = 0,275$), concluíram que as características mineralógicas do agregado graúdo influem significativamente na resistência e no módulo de elasticidade do concreto. Com a crescente utilização de concreto de alta resistência como material estrutural, necessita-se de mais informações sobre suas propriedades mecânicas. Estudos realizados até o momento têm demonstrado que as relações empíricas entre a resistência à compressão e outras propriedades, como resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade, criada para concretos normais, nem sempre podem ser utilizados para concretos de alta resistência. Geralmente, nota-se que as trincas do HSC (*High Strength Concrete*) são mais localizadas e se aproximam de um comportamento de material homogêneo em relação ao concreto de resistência normal.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho possui o intuito de investigar a relação entre a resistência à flexão e a energia de fratura de concretos convencionais e de alta resistência feitos com diferentes materiais (granito e basalto), tamanhos (9,5 e 19 mm) e teores de agregados graúdos por metro cúbico (m^3) de concreto, em concreto de alta resistência com relação água/cimento igual a 0,35. Foram realizadas 16 misturas e executados 192 ensaios mecânicos e de fratura, medindo-se várias resistências, entre elas a resistência à tração na flexão, módulo de deformação e energia de fratura do concreto. Informações mais detalhadas podem ser obtidas no trabalho de POMPEU NETO [16].

2.1 Materiais

2.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CPV-ARI (Cimento Portland V – Alta Resistência Inicial), cujas características químicas, físicas e mecânicas preenchem os requisitos exigidos pela norma NBR-5733[2]. O material era comprovadamente novo, de modo que suas propriedades originais não estivessem alteradas foram tomados todos os cuidados, de acordo com a norma, de forma que fosse evitado o máximo possível, sua hidratação pelo contacto com a umidade do ar. As propriedades do cimento estão mostradas na Tabela 1 e foram fornecidas pelo fabricante.

2.1.2 Sílica ativa

A sílica utilizada foi importada, sendo proveniente de um mesmo lote de produção disponível no mercado, em forma de pó, suas características químicas e físicas fornecidas pelo fabricante são as seguintes: teor mínimo de sílica amorfa 85%, perda ao fogo máxima de 6%, diâmetro médio das partículas 0,15 μm , teor de umidade máximo 3% superfície específica 20 m^2/g , massa específica 2,20 g/cm^3 .

Tabela 1: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial CP V – ARI.

Composição Química (%)		Características físicas		Características Mecânicas	
SiO ₂	19,45	Finura(Blaine)	461,80 m^2/kg	Resistência à compressão	
Al ₂ O ₃	4,86	Início de pega	138 min.	1 dia	29,20 MPa
Fe ₂ O ₃	3,12	Fim de pega	200 min.	3 dias	42,60 MPa
CaO	64,44			7 dias	46,90 MPa
MgO	0,62			28 dias	56,10 MPa
SO ₃	2,94				
K ₂ O	0,70				
Perda ao fogo	2,92				

2.1.3 Agregado miúdo (areia)

Proveniente de rio e adquirido no comércio local (Campinas, SP), o agregado miúdo apresentou massa específica de 2,61 g/cm^3 , determinada de acordo com a NBR 9776[6], e com módulo de finura igual a

2,38. A composição granulométrica foi realizada atendendo as recomendações da NBR 7217 [7] e encontra-se dentro dos limites recomendados. A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização granulométrica.

Tabela 2: Composição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
6,3	5,10	0	0
4,8	7,30	1	1
2,4	23,50	2	3
1,2	96,00	10	13
0,6	316,40	32	45
0,3	346,00	35	80
0,15	161,80	16	96
Fundo	43,90	4	100
Total	1.000,00		
DMC (mm)	4,80		
Módulo de finura	2,38		
Graduação NBR7217	Fina		

2.1.4 Agregado graúdo

Foram usados dois tipos de agregados, um de origem basáltica e outro de origem granítica, ambos disponíveis comercialmente e com dimensões máximas características (DMC) de 19 mm e 9,5 mm, respectivamente. As propriedades físicas dos agregados, como a massa específica, absorção e massa unitária (MU) do agregado no estado solto, foram calculadas de acordo com a NBR 9937 [8] e NBR 7251[11], respectivamente, e são apresentadas na Tabela 3. A análise granulométrica foi executada de acordo com a NBR-7217 [7] e encontra-se dentro dos limites especificados pela NBR 7211[9]. Os resultados para a composição granulométrica são apresentados nas Tabelas 4 e 5. Também, na Figura 1, podemos verificar o aspecto dos agregados utilizados. Todos os agregados foram lavados e secos ao ar.

Tabela 3: Características dos agregados graúdos.

Tipo de Rocha	Basalto	Granito
Massa específica (g/cm ³)	2,98	2,60
Massa unitária (19 mm)	1,54	1,40
Massa unitária (9,5 mm)	1,45	1,35
Absorção (%)	0,02	0,50

Tabela 4: Composições Granulométricas do agregado graúdo.

Material Basalto : DMC 19,0 mm

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
76			
50			
38			
25			
19	26,0	1	1
12,5	2.556,80	50	51
9,5	925,3	19	70
6,3	1.158,5	23	93
4,8	252,8	5	98
Fundo	80,6	2	100
Total	5.000,0		669
DMC (mm)	19,0		
Módulo de finura	6,7		

Material Basalto : DMC 9,5 mm

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
76			
50			
38			
25			
19			
12,5			
9,5	0	0	0
6,3	1.951,4	39	39
4,8	2.223,4	44	83
Fundo	825,2	17	100
Total	5.000,0	100	583
DMC (mm)	9,3		
Módulo de finura	5,8		

Tabela 5: Composição Granulométrica do Agregado graúdo (Continuação).

Material Granito: **DMC 19,0 mm**

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
76			
50			
38			
25			
19	0	0	0
12,5	1.550,7	31	31
9,5	1.139,8	23	54
6,3	1.875,1	37	91
4,8	390,0	8	100
Fundo	44,4	1	683
Total	5.000,0	100	
DMC (mm)	19,0		
Módulo de finura	6,5		

Material Granito : **DMC 9,5 mm**

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
76			
50			
38			
25			
19			
12,5			
9,5	7,2	0	0
6,3	1.488,5	30	30
4,8	2.460,3	49	79
Fundo	1.044,0	21	100
Total	5.000,0	100	579
DMC (mm)	9,5		
Módulo de finura	5,8		



Figura 1: Amostras da areia e agregado graúdo (granito) utilizadas nas misturas.

2.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante é um produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, objetivando a melhora das propriedades do concreto, bem como melhor adequá-la a situação de acordo com a NBR 1763 [5] para produzir um concreto com determinada consistência de 3ª geração, base química de policarboxilatos, teor de sólidos de 28,5%, densidade variando de 1,076 a 1,107 g/cm³, de acordo com o manual do fabricante.

2.2 Concretos e proporções das misturas

Para investigar os efeitos do tipo de agregado, tamanho e consumo no módulo de elasticidade do concreto de alta resistência, foram executadas oito misturas de concreto, a relação água/materiais cimentícios foi de 0,35, foi utilizado um teor fixo de sílica ativa de 10% da massa do cimento e a quantidade de cimento foi de 400 kg/m³. Foram executadas quatro misturas com dimensão máxima característica (DMC) de 19,0 mm, duas de basalto e duas de granito com teores de agregado graúdo diferentes, e quatro misturas com DMC de 9,5 mm, duas para cada tipo de agregado com os respectivos teores diferentes de agregado graúdo no traço. As misturas foram codificadas de modo que AR significasse alta resistência. As letras B e G designam os agregados graúdos basalto e granito, respectivamente, o número colocado depois da letra indica o diâmetro máximo dos agregados, as letras minúsculas a e b mostram o teor elevado e baixo de brita no traço:

Tabela 6: Concreto relacionado ao tipo, tamanho e teor no traço.

Concreto	Tipo	Diâmetro (mm)	Teor
AR	B	9,5	a ou b
		19,0	a b
	G	9,5	a ou b
		19,0	a ou b

2.3 Produção dos concretos e preparo dos corpos-de-prova

Os materiais foram misturados em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de produção 150 litros. Foram colocadas, na seguinte ordem, e mantidas constantes para todas as misturas: 100% de brita mais 20% de água, 100% de cimento e sílica ativa no CAR (Concreto de Alta Resistência) e, finalmente, mais 30% de água, 80% de aditivo mais 50% de água, 100% de areia e 20% de aditivo. O tempo médio de mistura foi de 3 min. A caracterização da trabalhabilidade do concreto fresco foi de 30 e 50 mm de abatimento, medido pelo ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR 7223 [4], a massa específica foi determinada pela NBR 9833 [10]. As proporções das misturas, abatimento e massa específica são mostradas na Tabela 7. Foram moldados para cada mistura seis corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 100 mm x 450 mm. O processo de adensamento adotado foi o de mesa vibratória, seguindo as

prescrições da NBR 5738 [3], realizado em duas camadas. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos por uma lona de plástico e mantidos no ambiente do laboratório por aproximadamente vinte e quatro horas. As amostras foram então removidas dos moldes e transferidas para um tanque de água saturada com cal, localizado em uma câmara semi-úmida onde a umidade relativa era de 90%. As amostras foram armazenadas até a data de ruptura, sendo retiradas uma hora antes dos ensaios.

Tabela 7: Proporções das misturas do CAR.

Mistura	a/(c+5)	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	S.A (kg/m ³)	S.P (l/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	M.U (kg/m ³)	Abatimento (Mm)
AR-B19-a						780	1.212	2.554	
AR-B19-b						922	1.070	2.554	
AR-B9,5-a						780	1.212	-	
AR-B9,5-b	0,35	154	400	40	5,4	922	1.070	-	30
AR-G10-a						780	1.212	-	
AR-G10-b						922	1.070	-	
AR-9,5-a						780	1.212	-	
AR-9,5-b						922	1.070	2554	

2.4 Instrumentação e Equipamentos

Para os ensaios das propriedades de fratura, foi utilizado um equipamento modelo 810 TestStar -II-MTS com aquisição gráfica de dados acoplada a um microcomputador e célula de carga com capacidade de 100 kN. Para medida dos deslocamentos da linha de carga, foi utilizado um relógio da marca KYOWA DT-10D, com precisão de 0,001 mm, acoplado a um sistema de armação do tipo “Yoke” conforme Figura 2. Na boca do entalhe do corpo-de-prova foi posicionado um extensômetro do tipo MTS modelo 632.03C.20 de 4 mm. Três vigas para cada mistura foram ensaiadas na flexão, em três pontos, para determinação da energia de fratura (GF), módulo de elasticidade, K_{Ic} e CTOD_c (deslocamento de abertura da ponta da fissura crítico). Os ensaios de flexão em três pontos para a determinação dos parâmetros de fratura foram realizados à temperatura ambiente (25° C). Após fixação do corpo-de-prova, posicionou-se um extensômetro do tipo “Clip-gage” na fissura do corpo-de-prova e um relógio comparador na armação do “Yoke” (Figura 2). Na boca do entalhe do corpo-de-prova, foi posicionado um extensômetro do tipo MTS modelo 632.03C.20 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Outro computador foi utilizado para registrar os valores carga-deslocamento, como mostra a Figura 3. A energia de fratura (GF), fator de intensidade de tensão crítica (K_{Ic}) e o deslocamento de abertura na ponta da fissura crítico (CTOD_c) foram determinados de acordo com as recomendações da RILEM (Internacional Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). Os comprimentos das vigas ensaiadas neste estudo foram de 450 mm. As outras relações ficaram dentro do recomendado pela RILEM, ou seja, vão livre/altura S/b = 4, relação altura/entalhe inicial 1/3, e a largura do entalhe igual 3 mm. Um equipamento trabalhando em ciclo fechado, com o controle de CMOD (deslocamento de abertura da boca da fissura), foi utilizado objetivando assegurar uma propagação estável da fissura. O CMOD e a carga aplicada foram registrados continuamente durante o ensaio pelo “Clip-gage”. A taxa de carregamento foi controlada por uma taxa constante de incremento do CMOD de tal maneira que a duração do ensaio ficasse em torno de seis minutos. Em cada ensaio, a amostra foi carregada progressivamente e um ciclo de carregamento-descarregamento foi executado quando a carga diminuía cerca de 95% da carga máxima na área pós-pico. Em seguida o carregamento continuou até a amostra seccionar em duas partes. A taxa do início do deslocamento da abertura da trinca adotada foi de 0,012 mm/min até o descarregamento e recarregamento e de 0,06 mm/min na parte final do ensaio até a ruptura.

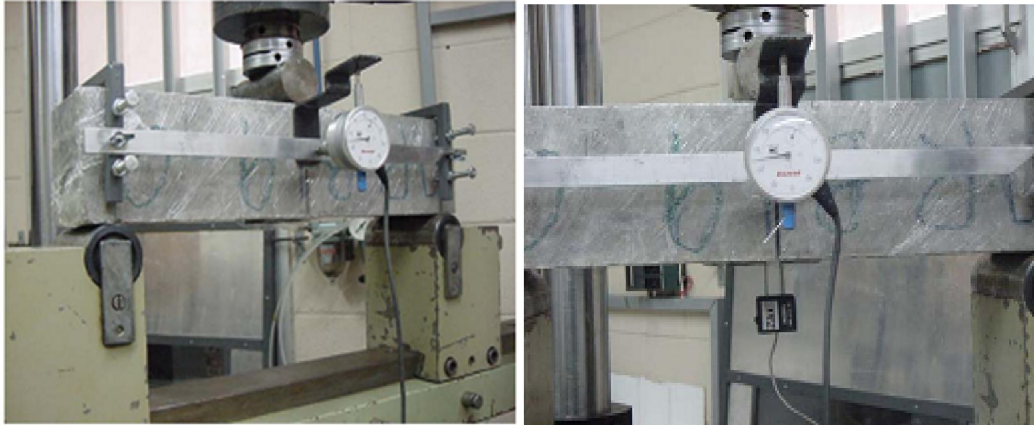


Figura 2: Detalhe de armação do “Yoke” e relógio comparador durante a realização do ensaio.



Figura 3: Ensaio de flexão em três pontos

2.4.1 Procedimento de cálculo

O módulo de elasticidade, E , do material foi determinado pelo trecho inicial linear da curva carga- $CMOD$, no ensaio de flexão em três pontos com viga entalhada no centro do corpo-de-prova, seguindo a proposta do comitê técnico 89-FMT da RILEM, de acordo como a Equação 1.

$$E = \frac{6 \cdot S \cdot \alpha_0 \cdot g_2(\alpha_0)}{c_i \cdot h^2 \cdot t} \quad (1)$$

Onde c_i é a flexibilidade inicial calculada da curva carga- $CMOD$, e a função geométrica $g_2(\alpha_0)$ é calculada pela seguinte Equação 2.

$$g_2(\alpha_0) = 0,76 - 2,28 \cdot \alpha_0 + 3,87 \cdot \alpha_0^2 - 2,04 \cdot \alpha_0^3 + \frac{0,66}{(1 - \alpha_0)^2} \quad (2)$$

O método da RILEM é baseado no módulo de fratura de dois parâmetros de JENQ e SHAH [14], sendo recomendada a flexão da viga em três pontos com $S/b = 4$. O tamanho da viga depende da dimensão característica máxima do agregado d_A de acordo com a Tabela 8. As principais variáveis envolvidas no cálculo do módulo de deformação são mostradas na Figura 6 e na Figura 7, já para os resultados apresentados neste trabalho.

Tabela 8: Tamanho de vigas para dimensões de K_{Ic} e $CTOD_c$.

DMC d_0 (mm)	Altura b (mm)	Largura t (mm)	Comprimento L (mm)	Vão livre S (mm)
1,0 – 25	150 ± 5	80 ± 5	700 ± 5	600 ± 5
25,1 – 50	250 ± 5	150 ± 5	1.100 ± 5	1.000 ± 5

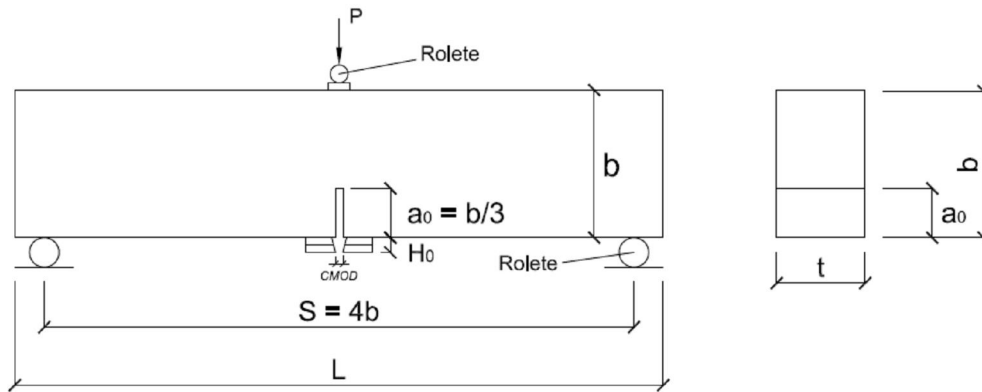


Figura 6: Sistema de ensaio e geometria do corpo-de-prova de acordo com a *RILEM*.

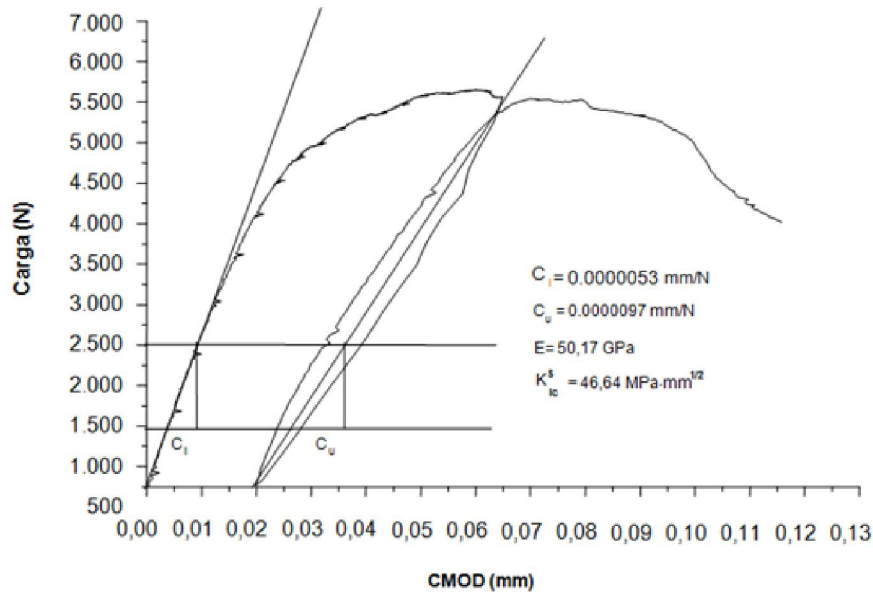


Figura 7: Curva Carga-*CMOD* para determinação de K_{Ic}^2 e $CTOD_c$, de acordo com a *RILEM*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 9 apresenta os resultados para o módulo de elasticidade (E) calculado da curva Carga – *CMOD* usando a flexibilidade inicial como descrito por SHAH *et al.*[17]. Cada valor representa a média de três observações experimentais. Os resultados obtidos são apresentados juntamente com os parâmetros estatísticos relativos às variáveis analisadas. Com os dados obtidos, foram traçados os gráficos para permitir uma melhor visualização dos resultados. Ressalta-se que cada ponto plotado representa a média dos valores observados em três corpos-de-prova, após a realização da análise dos resultados através dos procedimentos recomendados de MONTGOMERY [15].

Tabela 9. Módulo de deformação à flexão (CAR).

Misturas	Idade (Dias)	a/(c+s)	Módulo de deformação (GPa)	(Média) (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	IC (GPa)
AR-B19-a	163	0,35	50,17	45,71	6,4	13,9	15,8
			48,54				
			38,44				
AR-B19-b	163	0,35	45,94	45,55	2,6	5,7	6,5
			42,78				
			47,95				
AR-B9,5-a	140	0,35	47,64	46,33	1,7	3,7	4,3
			44,72				
			46,63				
AR-B9,5-b	140	0,35	49,80	47,26	3,6	7,6	12,4
			44,72				
			-				
AR-G19-a	94	0,35	32,71	38,93	9,4	24,2	23,4
			49,78				
			34,31				
AR-G19-b	94	0,35	38,68	35,04	6,2	17,7	15,4
			32,22				
			34,24				
AR-G9,5-a	92	0,35	35,24	33,88	3,8	11,2	9,5
			29,61				
			36,89				
AR-G9,5-b	92	0,35	40,35	37,82	2,8	7,4	6,9
			34,82				
			38,30				

Percebe-se claramente, na Figura 8, Figura 9 e Figura 10, uma ligeira influência do DMC, natureza do agregado e teor de agregado no módulo de elasticidade, provavelmente, por que estes parâmetros podem influenciar a microfissuração na zona de transição e, assim, afetar a forma da curva tensão-deformação. Como as propriedades elásticas do concreto são influenciadas pelas propriedades elásticas dos materiais constituintes e natureza da zona de transição entre os agregados e a pasta, nota-se que os concretos fabricados com agregados do tipo basalto apresentaram valores do módulo de elasticidade maiores que as misturas dos concretos contendo granito. BAALBAKI et al. [12] avaliaram o efeito de agregados grossos nas propriedades elásticas do concreto de alta resistência. Observou-se que o módulo de elasticidade do concreto de alta resistência é fortemente influenciado pelas propriedades elásticas dos agregados grossos. Similarmente, GIACCIO et al. [13] observaram que o mais alto módulo de elasticidade do concreto foi encontrado para o basalto-CAR, seguido pelo Calcário-CAR e Granito-CAR. Eles afirmaram que isso poderia ser atribuído a uma maior percentagem de microfissuras no calcário-CAR durante o carregamento aplicado pela primeira vez para medir o módulo de elasticidade. De acordo com AITCIN e METHA [10] e BAALBAKI et al. [12], a natureza dos agregados graúdos afeta significativamente o módulo de elasticidade do concreto de alta resistência. Essa influência foi atribuída à estrutura altamente densa da zona de transição, o que faz com que o concreto se comporte como um material compósito. Portanto, as características dos agregados podem ser importante na determinação das propriedades elásticas do concreto de alta resistência.

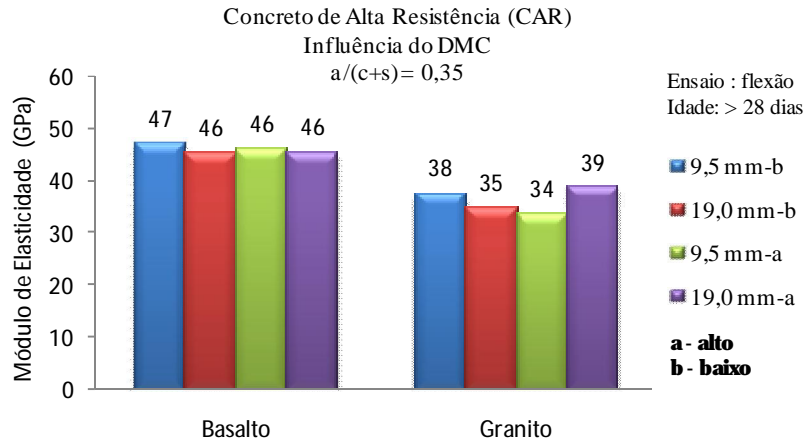


Figura 6: Influência do DMC do agregado graúdo no módulo de elasticidade do CAR.

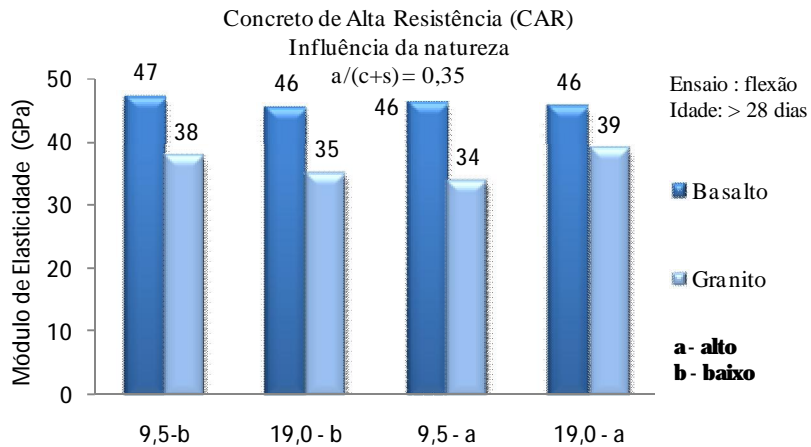


Figura 9: Influência da natureza do agregado graúdo no módulo de elasticidade do CAR.

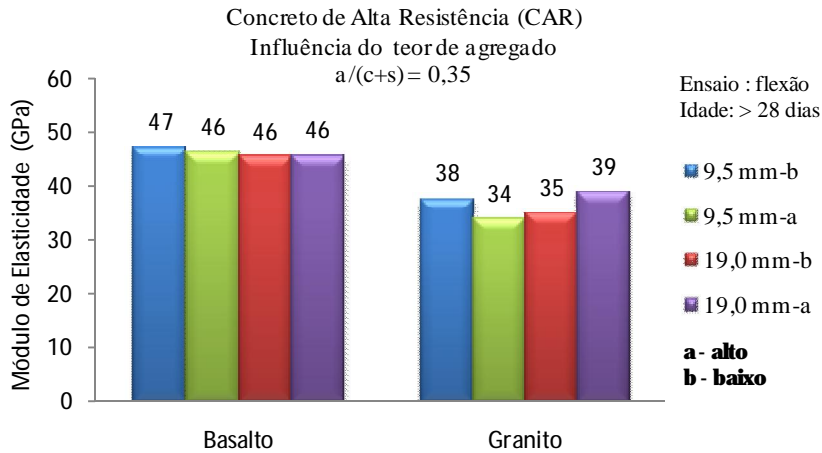


Figura 10: Influência do teor de agregado graúdo no módulo de elasticidade do CAR.

4 CONCLUSÃO

Do estudo realizado pode-se concluir que, na faixa pesquisada, tanto o diâmetro máximo característico quanto o teor de agregados apresentaram pouca influência no módulo de elasticidade do concreto de alta resistência quando comparadas as misturas com basalto. Entretanto, para as amostras com granito, a influência desses dois parâmetros foi mais significativa. Quanto à natureza do agregado, o módulo

de deformação é fortemente influenciado pelo tipo de agregado graúdo, ou seja, por suas propriedades mecânicas, sendo maior para o basalto.

5 CONCLUSÃO

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, FAPESPA e ITEGAM pelo apoio durante a preparação deste artigo.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland de alta resistência inicial*. NBR 5733, Rio de Janeiro, 2001.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Consistência pelo abatimento do tronco de cone*. NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Aditivos para concreto de cimento Portland*. NBR 1763. Rio de Janeiro, 1992.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Massa específica de agregado miúdo*. NBR 9776. Rio de Janeiro 1986.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Análise granulométrica da areia*. NBR 7217. Rio de Janeiro 1987.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Massa específica e absorção de agregado graúdo*. NBR 9937. Rio de Janeiro. 1987.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Composição granulométrica dos agregados*. NBR 7211. Rio de Janeiro 1987.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Determinação da massa específica e teor de ar pelo método gravimétrico*. NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Massa unitária de agregados em estado solto*. NBR 7251. Rio de Janeiro 1982.
- [12] BAALBAKI *et al.*, “Influence of coarse aggregate on elastic properties of high performance concrete”. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 5, pp. 499-503, 1991.
- [13] GIACCIO, G., ROCCO, C., VIOLINI, D., ZAPPITELLI, J., ZERBINO R., “High strength concretes incorporating different coarse aggregates”, *ACI Materials Journal*, v. 89, n. 3, pp. 292 – 246, 1992.
- [14] JENQ, Y.S., SHAH, S.P., “A two parameter fracture model for concrete”, *Journal of Engineering Mechanics*, v. 111, n. 4, pp. 1227-1241, 1985.
- [15] MONTGOMERY, D.C., *Design and analysis of experiments*, 3 ed., New York, John Wiley & Sons, 1991.
- [16] POMPEU NETO, B. B., *Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na Resistência e Energia de Fratura do Concreto*. Tese de D. Sc., UNICAMP/CAMPINAS, São Paulo, SP, Brasil, 2004.

- [17] SHAH, S.P., SWARTZ, S.E., OUYANG, C., *Fracture mechanics of concrete - applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*, New York, John Wiley & Sons, 1995.
- [18] ZHOU, F.P., BARR, B.I.G., LYDON, F. D., “Fracture proprieties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates”, *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 3, pp. 543 – 552, 1995.