

EFEITOS DO TIPO, TAMANHO E TEOR DE AGREGADOS GRAÚDOS NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO E ENRGIA DE FRATURA

Bernardo Borges Pompeu Neto

Universidade Federal do Pará – UFPA – Augusto Correia S/N – Pompeu@ufpa.br

Vitor Antonio Ducatti

Universidade estadual de Campinas – UNICAMP – Cidade Zeferino Vaz S/N – ducatti@fec.unicamp.br

Itamar Ferreira

Universidade estadual de Campinas - UNICAMP – Cidade Zeferino Vaz S/N –

Itamar@fem.unicamp.br

Resumo

Este trabalho expõe os resultados de um estudo conduzido para avaliar os efeitos do tipo, tamanho e consumo de agregado graúdo no comportamento do concreto com moderada e alta resistência e as relações entre a resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e a energia de fratura. As misturas de concreto estudadas continham agregados britados de basalto e de granito com dimensões máximas características de 9,5 mm e 19 mm e fração volumétrica no traço entre 0,65 e 0,75. A relação água/aglomerantes variou de 0,35 a 0,50. Nas misturas de alta resistência foi empregado um teor fixo de sílica ativa de dez por cento da massa do cimento de alta resistência inicial e teores adequados de aditivos superplasticificantes. Foram feitos dezesseis (16) misturas e realizados cento e noventa e dois ensaios mecânicos para medir a resistência à compressão, a resistência à flexão, resistência à tração, módulo de elasticidade e energia de fratura. As propriedades de fratura foram determinadas de acordo com o Comitê Técnico 89-FMT e FMC-50 da RILEM. As resistências à compressão dos concretos de acordo com os materiais empregados são de 40 a 60 MPa para os concretos de resistência média e de 70 a 110 MPa, para os concretos de alta resistência. Os resultados mostram que as resistências à compressão, tração, flexão e a energia de fratura dos concretos para uma dada relação água/aglomerantes depende do tipo, dimensões e teores de agregados. Para os concretos de alta resistência o comprimento característico do concreto aumenta com o tamanho do agregado graúdo.

Palavras chave: agregado, concreto, propriedades mecânicas, tenacidade, energia de fratura.

1. INTRODUÇÃO

No estudo do concreto os agregados graúdos desempenham um importante papel na mistura com as argamassas, seja do ponto de vista econômico como técnico, pois ocupam cerca de 60 a 80% do volume do concreto influenciando sobremaneira na resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto. O concreto é um material compósito, e devido a sua estrutura extremamente heterogênea, o seu desempenho mecânico não reflete a teoria simples dos compósitos. Enquanto a pasta de cimento e o agregado têm um comportamento tensão-deformação elástico linear até 80% de seu limite de resistência, o concreto começa a divergir para um comportamento não linear inelástico quando as tensões aplicadas alcançam 40-50% de seu limite de resistência. O comportamento não linear do concreto sob tensão pode ser explicado pela heterogeneidade do concreto constituído de três fases. A resistência do concreto é determinada pelas características da argamassa, agregado graúdo e zona de transição. Existe alguma controvérsia com

relação ao efeito do tamanho máximo do agregado sobre a resistência do concreto de Larrard (1995) *apud* Aitcin (2000).

Segundo Hillerborg (1985) há uma tendência de G_F aumentar quando o tamanho máximo do agregado aumenta de 8 para 20 mm. Walsh (1972); Bazant e Oh.(1983) *apud* Appa (2002) também relataram a mesma tendência com o aumento do tamanho do agregado. Contudo, Zhou et al. (1995), relata que a energia de fratura aumenta com o tamanho do agregado e dureza, e que o fator de intensidade de tensão, K_{Ic} , aumenta com o aumento da resistência à compressão. Giaccio et al. (1993) relata que a energia de fratura, G_F , do concreto aumenta com o aumento do tamanho do agregado e resistência do concreto.

O Objetivo desta pesquisa é comparar a resistência à compressão, resistência à flexão e a energia de fratura de concretos comuns e de alta resistência feitos com diferentes tipos, tamanhos e consumos de agregados graúdos pôr metro cúbico de concreto. Tem-se como objetivo secundário fornecer subsídios para o estabelecimento de alguns parâmetros relativos ao comportamento de fratura do concreto produzidos com materiais e tecnologia nacional.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Cimento: O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência Inicial CPV-ARI, cujas características químicas, físicas e mecânicas preenchem os requisitos exigidos pela norma NBR-5733/91.

Sílica ativa: A microsílica utilizada, é importada e 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 $0,15\mu\text{m}$, teor de umidade máximo 3% superfície específica $20\text{ m}^2/\text{g}$, massa específica $2,20\text{ g/cm}^3$

Agregado miúdo: Utilizou-se areia de rio, adquirida no comércio local (Campinas-SP), com massa específica $2,61\text{ g/cm}^3$ determinada de acordo com a NBR 9776/86, módulo de finura 2,38. A composição granulométrica foi executada atendendo as recomendações da NBR 7217/87 e encontra-se dentro dos limites das especificações.

Agregado graúdo: Foram usados dois tipos de agregados, um de origem basáltica e o outro de origem granítica, com tamanho máximo de 19mm e 9,5mm respectivamente. A análise granulométrica foi executada de acordo com a NBR-7217/87 e encontra-se dentro dos limites especificado pela NBR-7211.

Aditivos superplasticificantes: Para as misturas de concreto de resistência normal foi utilizado o superplasticificante reax - 3000 com teor de sólidos de 27% e para as misturas de concreto de alta resistência utilizou-se um superplasticificante de 3^a geração, base química de policarboxilatos, teor de sólidos de 28,5%, densidade variando de $1,076$ a $1,107\text{ g/cm}^3$ de acordo com o manual do fabricante.

2.2 Proporção das Misturas

Para investigar os efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na resistência do concreto e na energia de fratura dos concretos de moderada e alta resistência foram executadas dezenas misturas de concreto, sendo oito misturas para concretos de alta resistência e oito para concretos de resistência moderada. Nas misturas de concreto de resistência moderada, não se utilizou sílica ativa. Nos concretos de resistência moderada (CRM) a quantidade de cimento utilizado na mistura foi de 325 kg/m^3 e fator água/cimento de 0,50. No concreto de alta resistência (CAR) a relação água/aglomerantes foi de 0,35. Utilizou-se um teor fixo de sílica

ativa de 10% da massa do cimento e a quantidade de cimento foi de 400 kg/m³. As misturas são codificadas de modo que AR e RM signifiquem alta resistência e resistência moderada. 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** mostra o teor elevado e baixo de brita no traço:

2.3 Metodologia

No presente item são descritas a metodologia de obtenção dos corpos-de-prova, suas dimensões e a forma de condução dos ensaios.

2.3.1 Corpos-de-Prova: para a determinação da resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, moldaram-se para cada mistura seis corpos-de-prova cilíndricos, em formas metálicos de 100 x 200 mm, conforme estabelecido pela NBR-5738/84. Na determinação das propriedades de fratura e da resistência à tração na flexão, foram moldados para cada mistura, seis corpos-de-prova prismáticos, em formas de madeira de 100 x 100 x 450 mm. As dimensões das vigas estão ligeiramente diferentes das recomendadas pela RILEM, uma vez que os comprimentos das vigas reduziram-se de 840 mm para 450mm, por questões econômicas, facilidade de manuseio das amostras e capacidade da prensa disponível para condução dos ensaios. Um entalhe de aproximadamente 33,3 mm (1/3 da altura da viga) foi feito no centro de cada viga por uma serra diamantada de 3 mm de espessura, um dia antes dos ensaios, acarretando uma secagem parcial dos corpos-de-prova.

2.3.2 Ensaios

Com vistas à obtenção de parâmetros que caracterizassem os concretos, procedeu-se à execução dos seguintes ensaios:

Resistência à Compressão (f_c)

A realização deste ensaio procedeu-se de acordo com a NBR-5739/80. Em todos os casos ensaiou-se um mínimo de três corpos de provas, para obter-se o valor médio da resistência à compressão. Os corpos de provas foram ensaiados aos 28 dias de idade, utilizando-se uma máquina universal do tipo SOILTEST com capacidade de 1200 kN.

Ensaio de Tração por Compressão Diametral (f_t)

Nesse ensaio, um corpo de prova cilíndrico de 100 x 200 mm, do mesmo tipo usado no ensaio de compressão, é colocado com o eixo na horizontal entre os pratos da prensa, aplicando-se carga até a ruptura por tração indireta na forma de fendilhamento segundo o plano diametral vertical. Foram rompidos três corpos de prova para se determinar o valor médio da resistência à tração na idade de 28 dias. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR-7222/83. utilizando-se uma máquina universal do tipo SOILTEST com capacidade de 1200 kN.

Resistência à Tração na Flexão (f_f)

Neste ensaio, um prisma de concreto simples de 100 x 100 x 450 mm é submetido à flexão, como uma viga, com carregamento central, conforme a ASTM C293-94. Para proceder aos ensaios de flexão em três pontos em vigas não entalhadas utilizou-se uma prensa de ensaio universal, da marca Heckert (WPMA) com capacidade de 400kN.

Módulo de Elasticidade (E)

O Módulo de elasticidade 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.

Ensaio de Energia de Fratura

Três vigas para cada mistura foram ensaiadas na flexão, em três pontos, para determinar a energia de fratura (G_F), módulo de elasticidade, K_{Ic} e CTOD_c. Os ensaio de flexão em três pontos para a determinação dos parâmetros de fratura foi feita à temperatura ambiente (25° C). Após fixar o C.P, posiciona-se um extensômetro do tipo “Clip-gage” na fissura do C.P e um relógio comparador na armação do “Yoke”. Um outro, computador, é utilizado para registrar os valores carga-deslocamento. A energia de fratura, G_F , tenacidade à fratura, K_{Ic}^S e o deslocamento da abertura da ponta da fissura crítico, CTOD_c determinou-se de acordo com as recomendações da RILEM por meios de ensaio de flexão em três pontos em vigas entalhadas. As outras relações ficaram dentro das recomendadas pela RILEM, ou seja, relação entre vão livre/altura S/b=4, relação altura/entalhe inicial = 1/3, e a largura do entalhe igual 3mm. Um equipamento trabalhando em ciclo fechado com o controle do CMOD foi utilizado objetivando assegurar uma propagação estável da fissura. O CMOD e a carga aplicada registraram-se continuamente durante o ensaio. Utilizou-se um Clip-gauge para medir o CMOD. Mediram-se os deslocamentos da linha de carga por meios de um relógio comparador. 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 carregou-se a amostra progressivamente e um ciclo de carregamento-descarregamento foi executado quando a carga diminuía na área pós-pico cerca de 95% da carga máxima. Em seguida o carregamento continuou até a amostra quebrar em duas partes. A taxa do inicio do carregamento 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. A duração total de cada ensaio foi de aproximadamente seis minutos. Para a realização do ensaio utilizou-se um equipamento modelo 810 TestStar -II-MTS com aquisição gráfica de dados acoplada a um microcomputador com célula de carga de 100 kN. Na medida dos deslocamentos da linha de carga usou-se um relógio da marca KYOWA DT-10D, com precisão de 0,001 mm, acoplado a um sistema de armação do tipo “yoke” conforme detalhe da Fig. 3.2. Na boca da ranhura do corpo de prova, posicionou-se um extensômetro do tipo MTS modelo 632.03C.20 (clip gage) com faixa de 4mm.



Figura 3.2. Detalhe do posicionamento dos extensômetros

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas e de fratura das várias misturas de concreto. A resistência à compressão do concreto varia de 47 a 61 MPa para o concreto de resistência moderada (CRM) e de 76 a 106 MPa para o concreto de alta resistência (CAR). A resistência do CRM aumenta para o basalto com a diminuição do diâmetro máximo. Para o granito ocorre o inverso, mas com os valores muito próximos. As alterações promovidas na zona de transição pastas – agregados e a melhor distribuição das tensões devido ao aumento da superfície específica disponível para contato, contribuíram para o aumento da resistência à compressão do concreto com a diminuição do diâmetro máximo. Para o granito os resultados encontrados coincidem com os relatados por Rao e Prasad (2002).

Tabela 1. propriedades mecânicas e de fratura das várias misturas de concreto

Misturas	C. Axial (MPa) (f_c)	Tração (MPa)		M.E (Gpa)	E. Fratura (N/m)	Tenacidade (MPa \sqrt{m})	Comprimento Característico
		Diametral (f_t)	Flexão (f'_t)				
AR-B19-a	93,06	6,53	10,40	45,71	163,85	2,20	176
AR-B19-b	102,70	6,87	10,96	45,55	133,51	2,08	129
AR-B9,5-a	106,76	6,68	12,08	46,33	150,71	2,06	156
AR-B9,5-b	96,55	7,31	9,03	47,26	118,17	1,93	105
AR-G19-a	90,09	5,36	9,10	38,93	125,46	1,75	170
AR-G19-b	90,39	5,20	8,80	35,04	140,33	1,84	182
AR-G9,5-a	76,43	5,06	8,90	33,88	121,33	1,75	161
AR-G9,5-b	84,37	4,87	10,02	37,82	109,65	1,91	175
RM-B19-a	49,78	4,01	5,4	39,05	150,97	1,60	367
RM-B19-b	57,12	4,66	5,78	38,36	168,70	1,53	298
RM-B9,5-a	58,98	4,48	6,76	44,01	184,13	1,82	404
RM-B9,5-b	61,45	5,04	6,84	27,97	130,86	1,46	144
RM-G19-a	50,37	4,28	4,79	26,09	116,64	1,25	166
RM-G19-b	54,10	4,34	5,06	25,50	101,75	1,29	138
RM-G9,5-a	47,61	3,77	5,71	28,79	153,58	1,56	311
RM-G9,5-b	53,04	4,25	5,11	24,11	114,12	1,30	152

As Figuras 1 e 2, mostram as variações das resistências à compressão com as dimensões máximas características dos agregados nos CRM e nos CAR. No CAR percebe-se claramente, que há um aumento da resistência com o aumento das dimensões máximas características. Exceção para as misturas (AR-B19-a; AR-B9,5-a).

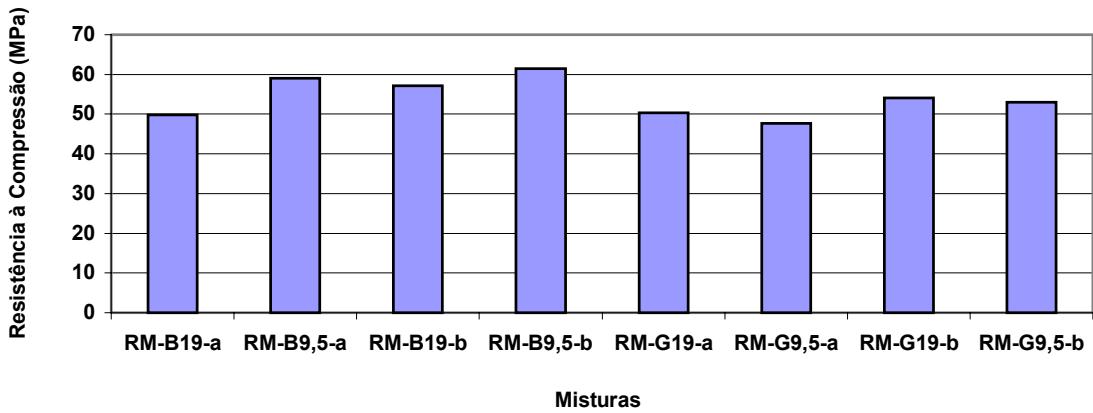


Figura 1. Influência da dimensão máxima característica na resistência à compressão (CRM).

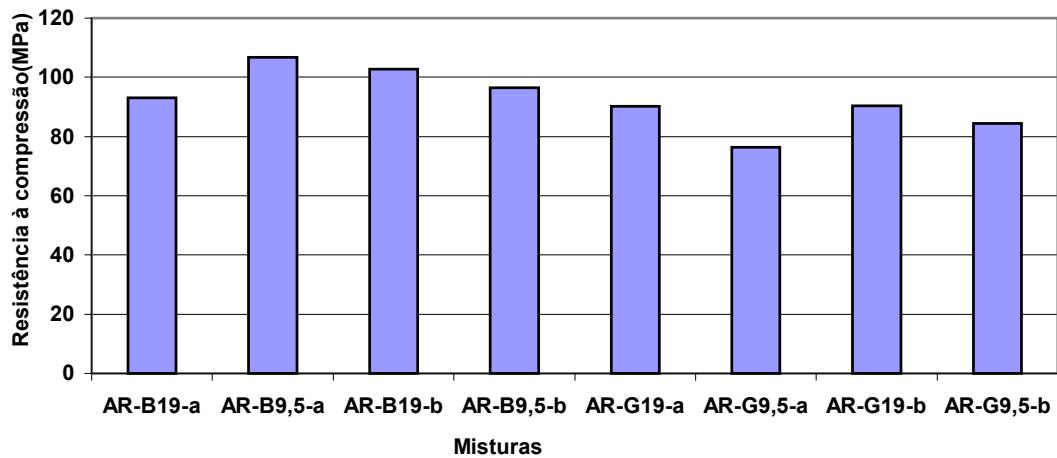


Figura 2. Influência da dimensão máxima característica na resistência à compressão (CAR).

Na Figura 3, observa-se para o (CRM) um aumento na resistência com a redução do teor de agregado. Para o CAR os resultados não foram conclusivos.

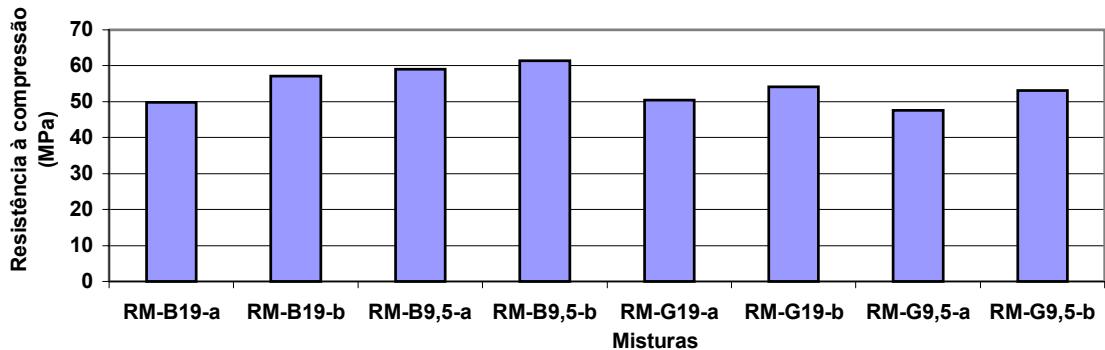


Figura 3. Influência do teor de agregado graúdo na resistência à compressão (CRM)

Quanto à influência da natureza do agregado nota-se nas fig. 4 e 5 que os concretos produzidos com o basalto apresentaram as maiores resistências à compressão tanto para o CRM como para o CAR. Isto pode ser atribuído a menor resistência esperada para o agregado de granito. Uma similar tendência observa-se nos casos da resistência à tração.

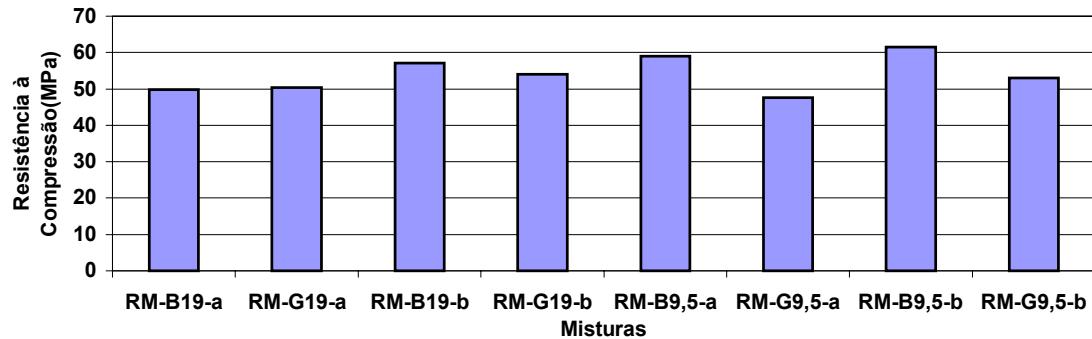


Figura. 4. Influência da natureza do agregado graúdo na resistência à compressão (CRM)

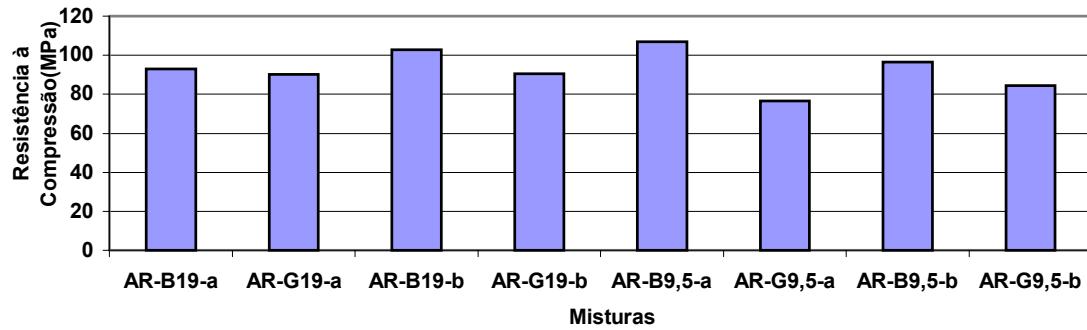


Figura 5. Influência da natureza do agregado graúdo na resistência à compressão (CAR)

Na Tabela 1 percebem-se, uma ligeira influência do teor de agregado, diâmetro máximo e natureza do 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.

Para a maioria dos CRM e CAR a energia de fratura G_F aumenta quando o teor de agregado aumenta. Isto pode ser devido ao melhoramento da ligação na interface, que resultou no desenvolvimento da fratura através do agregado. Para o CRM a energia de fratura aumenta quando o diâmetro máximo diminui. A energia de fratura aumenta com a resistência à compressão do concreto. Enquanto para o CAR ocorre ao contrário, isto é, a energia de fratura aumenta com o aumento do diâmetro máximo. No CAR, isto está de acordo com o encontrado por Rao e Prasad (2002).

Nas figuras 7 e 8 observa-se que tanto para o CRM como para o CAR a energia de fratura é maior para as misturas de concreto executadas com o agregado do tipo basalto.

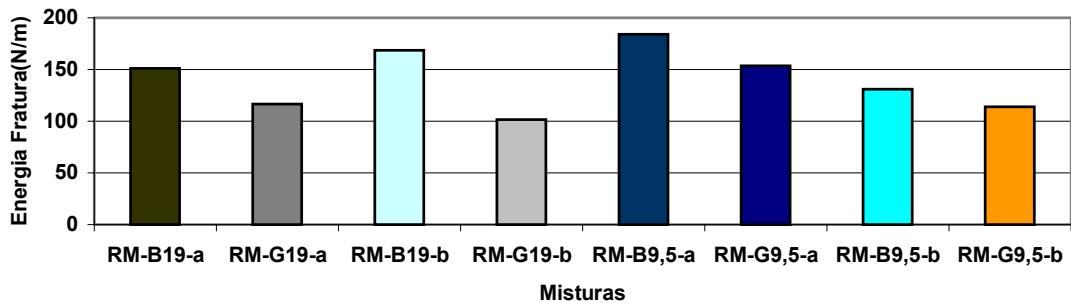


Figura 7. Influência da natureza do agregado graúdo na energia de fratura (G_F) do CRM.

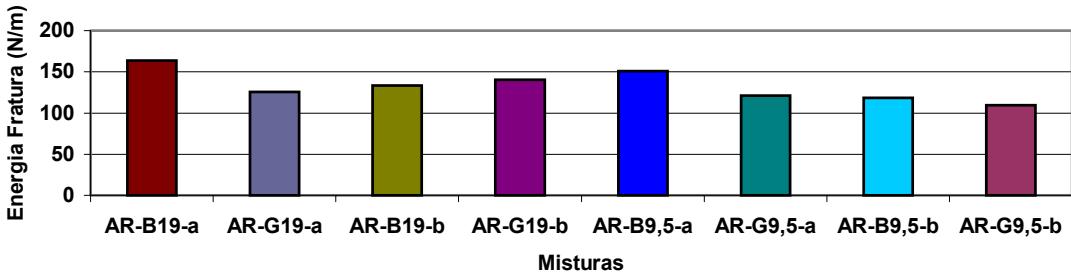


Figura 8. Influência da natureza do agregado graúdo na energia de fratura (G_F) do CAR.

Na figura 9 percebe-se uma rápida tendência de aumento da tenacidade à fratura com o aumento do teor de agregado para os CRM. No CAR observa-se a mesma tendência para as misturas de concreto feito com o basalto enquanto para o granito ocorre o inverso. A tenacidade à fratura aumenta significativamente com a natureza do agregado tanto para o CAR, como para o CRM. No CAR o comprimento característico aumenta com o aumento do tamanho máximo do agregado, além disso, o comprimento característico do concreto diminui quando a resistência à compressão do concreto aumenta e a fragilidade aumenta significativamente.

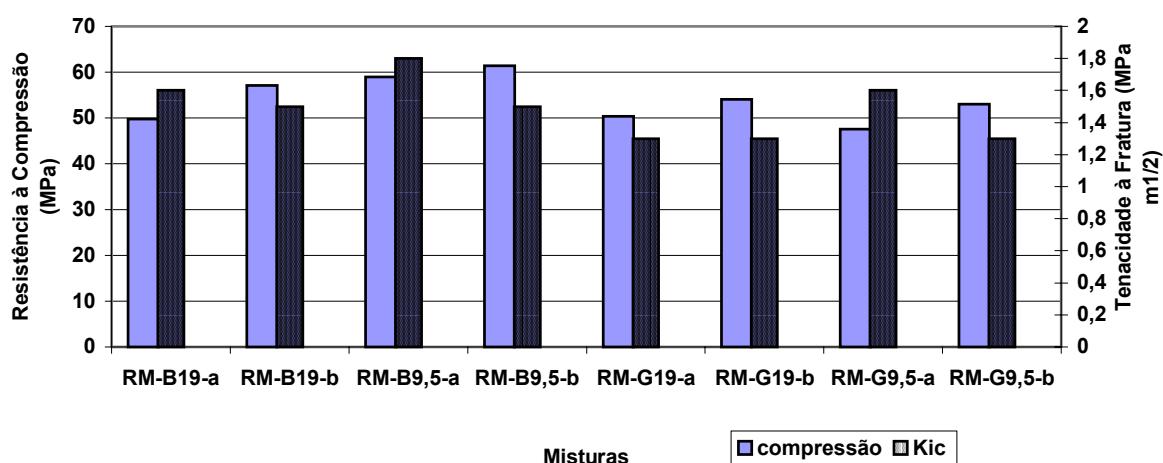


Figura 9. Efeitos do teor de agregado na resistência à compressão e na tenacidade à fratura do CRM

4. Conclusões

A resistência à compressão, tração, flexão e módulo de elasticidade são influenciados pelas características dos agregados graúdos (teor, diâmetro máximo e natureza do agregado). Para o CRM a resistência aumenta quando a dimensão máxima característica (DMC) do agregado diminui. Para o CAR a resistência do concreto aumenta com o aumento da DMC. Uma similar tendência é observada nos casos de resistência à tração. A energia de fratura e a tenacidade à fratura aumentam com a natureza do agregado, sendo maior, para o basalto. A energia de fratura aumenta quando a resistência à compressão do concreto aumenta. Nos concretos de alta resistência, as fissuras caminham através do agregado e a fratura tende a ser de natureza frágil. Nos concretos de resistência moderada, as fissuras desenvolvem-se ao redor dos agregados graúdos resultando em um caminho de fratura mais tortuoso. No concreto de alta resistência o comprimento característico aumenta com o aumento da dimensão máxima característica. Além disso, o comprimento característico do concreto diminui quando a resistência à compressão do concreto aumenta, consequentemente aumentando a fragilidade do concreto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES

REFERÊNCIAS

- Appa, R. and Prasad, B.K., 2002, “Fracture energy and softening behavior of high-strength concrete”, Cement and concrete Research, v.32, pp.247-252.
- Aitcin,P.C, 2000 “Concreto de Alto Desempenho” ed. Pini, São Paulo, cap.6, pp.181-239.
- Aitcin, P.C. and Mehta, P.K., 1990 “Effect of Coarse-Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 87, N°2 , March-April, pp 103-107.
- Hillerborg, A. 1985, “The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy G_f of Concrete.” Materials and Structures, Vol.. 18, N°106, pp. 291– 296.
- RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete, 1985, “Test Methods, Determination of the fracture Energy of mortar and concrete by Means of Three- point bend Tests on notched Beams”, Materials and Structures, Vol. 18, N° 106, pp. 285-290.
- RILEM Recommendation, Materials and Structures, 1985, V.18, N° 16, pp. 287- 290
- RILEM, -TC50- FMC, Fracture Mechanics of Concrete, 1985, “ Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of 3- point bad test on notched beams”
- Zhou, F.P., Barr, B. I. G. and Lydon, F. D., 1995, “Fracture Properties of High Strength Concrete with Varing Silica Fume Content And Aggregates”, Cement and Concrete Research, Vol. 25 N°3, pp 543- 552.
- Giaccio, G., ROCCO C. and ZERBINO R., 1993, “The fracture energy (G_p) of high-Strength Concretes” Materials and Structures Vol. 26, N° 161, pp. 381 – 386.

EFFECTS OF TYPE, SIZE AND CONTENT OF COARSE AGGREGATE ON CONCRETE STRENGTH AND FRACTURE ENERGY

Bernardo Borges Pompeu Neto

Federal University of Pará – UFPA – Augusto Correia S/N – Pompeu@ufpa.br

Vitor Antonio Ducatti

Campinas University – UNICAMP –Zeferino Vaz city S/N – ducatti@fec.unicamp.br

Itamar Ferreira

Campinas University - UNICAMP – Zeferino Vaz City S/N – Itamar@fem.unicamp.br

Abstract

This thesis presents the results of the experimental study carried out for considering the effects of the type, size and amount of coarse aggregate on the behavior of normal and high strength concretes, and on relationship among the fracture energy and typical mechanical strength of concrete. The experimental concrete mixtures were made with basalt and granite coarse aggregates having maximum size particle 9.5 mm e 19 mm and volumetrically fraction in the mixture ranging from 0.65 to 0.75. The water to cementation materials ratio ranged from 0.35 to 0.50. The high strength concrete mixtures contained a fixed amount of 10 percent of silica fume in relation to the weight of the high early strength Portland cement used and a proper addition of superplasticizer agent. Sixteen (16) concrete batching and one hundred and ninety – two tests were carried out to measure the mechanical resistance of concrete compressive strength, flexure strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity) and fracture energy. The fracture properties measured in agreement of the RILEM test methods. The concrete compressive strength ranged from 40 to 60 MPa, and from 70 to 110 MPa, for moderate and high strength concretes, respectively, depending on the type of coarse aggregate utilized. The results showed that the concrete resistance (compressive, flexure, splitting tensile) and fracture energy, at given water to binder ratio, depend on type, particle dimension and content of coarse aggregate. The characteristic length of Hillerborg's fictions cracks model increases with the variation in the particle dimension of coarse aggregate.

Key words: coarse aggregates, concrete, mechanical properties, toughness, fracture energy.