

Experimental study of the mechanical behavior of self-compacting concrete based on fracture mechanics

Estudo experimental do comportamento mecânico do concreto autoadensável com base na mecânica da fratura



G. O. RIBEIRO ^a
gabriel@dees.ufmg.br

P. C. GUETTI ^b
guettipc@gmail.com

P. SERNA ^c
pserna@cts.upv.es

Abstract

Considering the physical nonlinearity of concrete and the fundamentals of fracture mechanics for quasi-brittle materials, the objective of this study was to determine the fracture energy and the length of the fracture process zone (FPZ) as well as the modulus of elasticity, the tensile strength and the compressive strength of self-compacting concrete (SCC) to characterize its mechanical behavior. A series of tests, including a three-point bending test of SCC and conventional vibrated concrete (CVC) specimens, with a notch at mid-span, and tensile and compressive tests were performed. The mechanical parameters obtained from the CVC specimens were considered as a comparative reference. The effect of the following variables was evaluated and considered at two levels: compressive strength (30 and 50 MPa), granular composition (fine and coarse particle size) and maximum diameter of the aggregate (12 and 20 mm). The effect of these variables on the mechanical behaviors of the SCC specimens was evaluated based on the test results of specimens of four types of concrete, which were obtained from the combination of the variables. The bending tests were performed according to the RILEM TC 89-FMT recommendations, which are based on the size-effect method.

Keywords: fracture mechanics, self-compacting concrete, size effect.

Resumo

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar o comportamento mecânico dos concretos autoadensáveis (CAA), tendo em vista a não linearidade física e os fundamentos da mecânica da fratura para materiais parcialmente frágeis. Neste trabalho busca-se a determinação da energia de fratura e do comprimento da Zona de Processo de Fratura, além do módulo de elasticidade, da resistência à tração e à compressão. Para tanto, foi realizada uma série de testes constando vigas de CAA submetidas à flexão de três pontos e vigas de concretos convencionais vibrados (CCV), com entalhe no meio do vão, sendo que os parâmetros dos corpos-de-prova de CCV serviram como referência comparativa. Foram considerados com dois níveis de resistência à compressão (30 e 50 MPa), duas composições granulométrica (granulometria fina e granulometria grossa) e dois diâmetros máximo do agregado (12 e 20 mm). A avaliação da influência destas variáveis no comportamento mecânico do CAA foi feita a partir da dosagem de quatro tipos de concretos obtidos pela combinação das variáveis mencionadas. Os ensaios de flexão foram feitos de acordo com a recomendação do RILEM TC 89-FMT, que se baseia no Método do Efeito de Tamanho.

Palavras-chave: mecânica da fratura, concreto autoadensável, efeito de tamanho.

^a Department of Structural Engineering, School of Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil;

^b Institute of Sciences and Technology, Department of Civil Engineering, Federal University of Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, Brazil;

^c Institute of Concrete Science and Technology, Department of Construction Engineering, Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain.

1. Introdução

O concreto autoadensável (CAA) surgiu no Japão em 1986, tendo sido utilizado pela primeira vez em 1988. O CAA pode ser definido como um concreto capaz de fluir e espalhar-se pela fôrma pela ação de seu peso próprio, transpondo obstáculos sem segregar e exsudar, garantindo uma distribuição uniforme dos agregados. Estas são as principais características deste composto em seu estado fresco.

O CAA é um caso típico de material parcialmente-frágil, que após atingir o valor máximo de sollicitação num ensaio de tração, apresenta um ramo de amolecimento no diagrama tensão-deformação, onde o valor da sollicitação diminui continuamente acompanhado por aumento significativo das deformações. O comportamento dos concretos pode ser formulado com a utilização dos fundamentos da Mecânica da Fratura, visando à simulação de um comportamento mecânico mais realista. A utilização adequada da Mecânica da Fratura, com aplicação de modelos matemáticos mais representativos do comportamento do concreto, pode conduzir à formulação de modelos constitutivos mais precisos e menos sujeitos aos efeitos de escala. Evidentemente, para a aplicação da Mecânica da Fratura, existe a necessidade da determinação de parâmetros experimentais que caracterizem o processo de fratura. A integração entre modelos matemáticos e a capacidade de determinação experimental dos parâmetros de tais modelos, possibilitam a utilização da mecânica da fratura do concreto em aplicações práticas (BITTENCOURT [1]).

BAŽANT [2,3] afirma que o efeito de tamanho observado nas estruturas de concreto é uma das principais razões para a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura no concreto. O caminho

mais fácil para essa aplicação é por meio das formulações da mecânica da fratura elástico-linear (MFEL). Assim, baseado no modelo de trinca efetiva e na sua dependência de tamanho, BAŽANT et al. [4] definiram a energia de fratura (G_f) e o comprimento da zona de processo de fratura (c_f) com relação a estruturas de tamanho infinito e a uma geometria qualquer. Para se determinar G_f e c_f experimentalmente a partir de corpos-de-prova de tamanho moderado, os referidos autores propuseram a lei do efeito de tamanho, visando à caracterização do material, de modo a isolar a influência do tamanho e da geometria da estrutura.

2. Materiais e composição dos concretos

Os materiais utilizados para a produção dos vários tipos de CAA, que compõem o programa experimental são cimento CEM I 52,5R (UNE-EM 197-1, 2011), classificação da Norma Européia como sendo cimento Portland de alta resistência inicial, e cimento CEM II/B-M(V-LL) 32,5N (UNE-EM 197-1, 2011), classificação da Norma Européia como sendo um cimento Portland de resistência mediana com adição de cinzas volante de sílica e calcária, a composição destes cimentos é apresentada na tabela[1]; filler calcário; areia natural rolada e lavada; areia artificial calcária britada; aditivo polifuncional, redutor de água; superplastificante a base de éteres policarboxílicos; britas calcárias com diâmetros mínimos/máximos de 4/7 mm, 7/12 mm e 12/20 mm, e módulo granulométrico de 5,4; 6,6 e 8,5, respectivamente. O módulo de finura da areia natural foi de 2,8 e o da areia artificial de 2,5.

As dosagens dos concretos foram realizadas imaginando-se dois tipos básicos de concreto. O primeiro é um concreto convencional para obras em geral e o segundo um concreto adequado para as

Tabela 1

Composição dos cimentos

Componentes	Cimento	
	CEM II/B-M(V-LL)	CEM I 52,5R
Clínquer	65 – 79 %	95 – 100 %
Cinza volante de sílica e calcária	21 – 35 %	-
Constituintes minoritários	0 – 5 %	0 – 5 %
Características químicas	-	-
Sulfatos	< 3,5 %	3,4 %
Cloretos	< 0,1 %	-
Cal livre	-	1,7 %
Características físicas	-	-
Início de pega	> 75 minutos	> 45 minutos
Expansibilidade	< 10 mm	< 10 mm
Finura Blaine	4.493 cm ² /g	4.608 cm ² /g
Resistência à compressão	-	-
2 dias	-	> 30 Mpa
7 dias	> 16 MPa	-
28 dias	> 32,5 MPa	> 52,5 MPa

Tabela 2
Tipos de concretos

Tipos de concretos	Resistência à compressão f_c (MPa)	Diâmetro máximo do agregado $\Phi_{m\acute{a}x}$ (mm)	Granulometria	Nomenclatura	
				CVC	SCC
1	30	12	Fina	V30d12F	A30d12F
2	30	20	Grossa	V30d20G	A30d20G
3	50	12	Grossa	V50d12G	A50d12G
4	50	20	Fina	V50d20F	A50d20F

indústrias de estruturas pré-fabricadas, cujas resistências à compressão consideradas como de dosagem foram respectivamente de 30 e 50 MPa. A partir destes concretos foram escolhidas as variáveis de interesse da pesquisa, a saber: resistência à compressão; diâmetros máximos dos agregados, 12 e 20 mm; e granulometria fina e grossa.

A partir da escolha das variáveis de interesse realizou-se um estudo estatístico baseado em projeto de experimentos e no método de Taguchi apud Serna [5], para determinar o número de tipos de concretos necessários para a caracterização da influência destas variáveis de interesse no comportamento mecânico destes concretos. Este estudo indicou um número final de 4 tipos de concretos autoadensáveis (CAA) e 4 tipos de concretos convencionais vibrados (CCV), sendo que os últimos serviram como referência. A tabela[2] apresenta os tipos de CAA e CCV em função das variáveis de interesse.

Na nomenclatura adotada para os CCV conforme tabela[2], a primeira letra indica se o concreto foi vibrado ou é autoadensável: V indica que o concreto foi vibrado, A indica que é autoadensável; o número seguinte à primeira letra, indica a classe de resistência à

compressão, de acordo com a resistência alvo de dosagem, podendo ser 30 ou 50 MPa; a letra d corresponde ao diâmetro máximo do agregado, o diâmetro máximo do agregado 12 mm (d12) ou 20 mm (d20), respectivamente; a última letra indica a composição granulométrica, F equivale à granulometria fina e G equivale à granulometria grossa.

Após a definição dos tipos de concretos foi realizada a dosagem dos mesmos, para isso, foi tomada como base as dosagens dos concretos V30d20G e V50d12G.

A quantidade de cimento e o fator água/cimento foram determinados a partir da resistência à compressão desejada. A proporção dos agregados foi feita por meio da curva teórica de Bolomey, ajustando-se sempre o diâmetro máximo do agregado e a granulometria (figuras [1] e [2]). Para se obter uma granulometria mais fina ou mais grossa, variou-se a relação entre brita e areia, assim como a relação entre a areia artificial e areia natural. A partir da proporção dos materiais foram realizados testes com os concretos visando ajustar a quantidade de aditivo plastificante e superplastificante, assim como a quantidade de filler, que foi usado somente

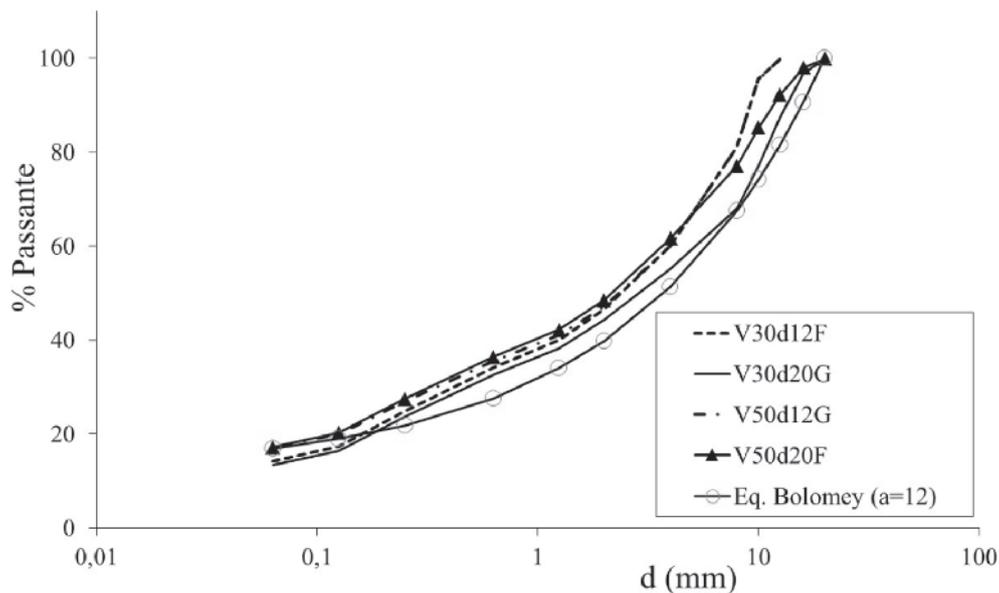


Figura 1
Curva granulométrica dos concretos convencionais vibrados

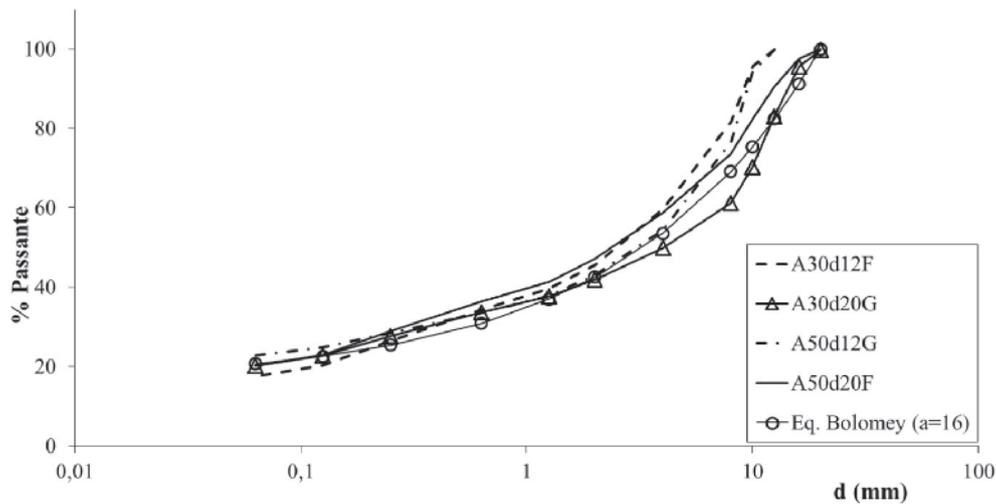


Figura 2
Curva granulométrica dos concretos autoadensáveis

no concreto A30d20G, para aumentar a viscosidade, evitando a segregação dos agregados. A tabela[3] apresenta a composição dos quatro tipos de CCV e CAA, assim como o resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone Abrams (S), obtido para estes concretos, sendo medida a altura do abatimento nos CCV e o espalhamento nos CAA. A verificação da ocorrência de segregação foi feita por meio da inspeção visual, após o ensaio de cone de Abrams, no estado fresco, e por meio de corte longitudinal de corpos-de-prova cilíndricos de 15x30 cm, no estado endurecido.

3. Procedimentos experimentais e metodologia

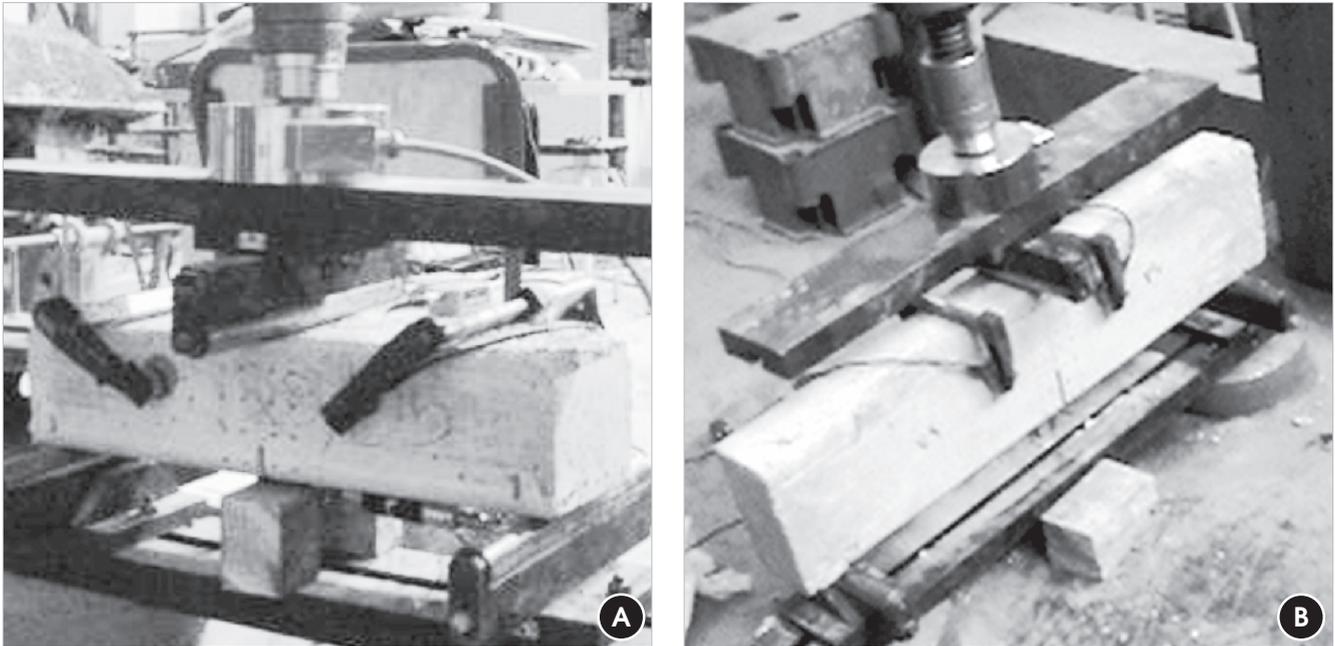
Seguindo a recomendação TC 89-FMT do RILEM [5], caracterizou-se o comportamento de pós-pico de carga do CAA, com base na energia de fratura, a partir dos valores máximos de carga aplicada aos corpos-de-prova e das dimensões dos corpos-de-prova. Nes-

te sentido, foram realizados ensaios de flexão em três pontos em vigas de concreto autoadensável (CAA), isto é, vigas apoiadas em dois pontos, com aplicação de carga concentrada na direção perpendicular ao eixo, no meio do vão, onde havia um entalhe reduzindo a altura da seção transversal e condicionando a localização de deformações (figura [3]). Foram obtidas as curvas de carga-abertura de fissura (*CMOD*) durante os ensaios. Atenção especial foi dada à avaliação da influência da resistência à compressão, diâmetro máximo do agregado e granulometria, nas propriedades que caracterizam o comportamento à flexão do CAA. Todas as etapas da pesquisa experimental foram realizadas no Laboratório ICITECH da Universidad Politécnica de Valência (UPV) na Espanha, a partir de um convênio entre o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG (PROPEEs-UFMG) e a UPV apoiado pela CAPES.

Durante as investigação em laboratório foram realizados vários ensaios de flexão em três pontos em vigas com dimensões

Tabela 3
Composição dos materiais

Tipos de concreto	Cimento (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)			Areia (kg/m ³)		Filer (kg/m ³)	Aditivos (kg/m ₃)		Cone Abrams (mm)
			4/7	7/12	12/20	Natural	Artificial		Plast.	Super.	
V30d12F	325	195	346	643	-	860	-	-	1,89	-	100
V30d20G	325	195	209	366	471	839	-	-	1,80	-	120
V50d12G	380	190	336	623	-	834	-	-	1,90	2,28	100
V50d20F	380	190	335	335	287	831	-	-	2,28	1,90	140
A30d12F	325	195	359	538	-	750	195	-	1,63	5,20	600
A30d20G	325	195	142	283	519	533	362	45	2,60	5,20	600
A50d12G	380	190	353	432	-	524	364	-	1,90	6,08	640
A50d20F	380	190	264	308	308	732	191	-	1,90	6,84	600


Figura 3

Ensaio de flexão em três pontos em vigas de concreto com entalhe no meio do vão de diferentes tamanhos. a) viga com dimensões 80 x 100 x 410 mm³; b) viga com dimensões 160 x 100 x 770 mm³

variadas. As dimensões adotadas para as vigas foram: 80x100x410 mm³, 160x100x770 mm³ e 320x100x1500 mm³, com entalhe de 1/6 da altura na seção do meio do vão. Também foram realizados testes de compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos, para se determinar, respectivamente, as resistências à compressão e à tração, e o módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados nos exemplares de concretos aos 28 dias de idade. Após a concretagem, os corpos-de-prova foram mantidos cobertos com lona plástica no ambiente do laboratório, e posteriormente, após a desfôrma, foram conservados no ambiente do laboratório. Os entalhes foram feitos por meio de corte com disco adiamantado no período de 36 a 72 horas antes dos ensaios.

BAŽANT et al. [6] propuseram um método mais lógico de aplicar a mecânica da fratura elástica linear ao concreto, definindo a energia de fratura e o tamanho da zona de processo de fratura com base em corpos-de-prova de tamanho tendendo ao infinito, parâmetros denotados por G_f e c_f , respectivamente. A especificação TC 89-FMT prevê a determinação da energia de fratura (G_f) baseada neste método proposto por BAŽANT et al. [6], por meio de ensaios de flexão em três pontos, em vigas de concreto com entalhe na seção do meio do vão. Neste método, a energia de fratura é definida como energia específica, isto é, energia por unidade de área plana fissurada, requerida para a propagação de trinca em corpos-de-prova infinitamente grandes. Assim, teoricamente, a energia de fratura é independente do tamanho e da forma dos exemplares. As vigas devem possuir dimensões semelhantes e tamanhos diferentes, mantendo-se relação constante entre a altura da seção e o vão. Juntamente com a energia de fratura, deve-se determinar a resistência à tração, utilizando-se procedimentos tradicionais,

como por exemplo, o ensaio de compressão diametral em corpos cilíndricos e o módulo de elasticidade. De posse destes dados, a tensão nominal de falha pode ser determinada.

O procedimento experimental utilizado neste método é simples, pois os dados necessários para determinação da energia de fratura são os valores das cargas máximas e das dimensões de cada viga ensaiada, não sendo necessários equipamentos de extensometria sofisticados. A especificação TC 89FMT baseia-se na carga crítica aplicada e no comprimento da trinca elástica efetiva crítica. Os valores da energia de fratura (G_f), para peças de dimensões infinitas, são obtidos a partir da extrapolação das cargas máximas referentes a um número limitado de corpos-de-prova com dimensões finitas, através da regressão linear. Deve-se notar que um simples erro nos cálculos da inclinação da reta de regressão pode alterar significativamente o valor de G_f .

$$G_f = \frac{g_f(\alpha_0)}{E_c A} \quad (1)$$

onde E_c denota o módulo de elasticidade; A é a inclinação a inclinação da reta de regressão linear, e $g_f(\alpha_0)$ corresponde à energia de fratura adimensional determinada a partir da MFEL, considerando a razão entre o vão livre e a altura da viga igual a 4; α_0 é dado pela seguinte relação: $\alpha_0 = a_0/b$.

O valor de A é obtido a partir da reta de regressão linear ($Y = AX + C$). Os dados resultantes dos ensaios são a carga máxima e a dimensão característica das vigas ensaiadas, no caso, a altura da seção. O peso próprio de cada exemplar é somado aos valores das respectivas cargas máximas obtidas. Considerando Y como o inverso do quadrado da resistência nominal de cada viga e, X ,

a altura da respectiva seção transversal, efetua-se a regressão linear dos dados formados pelo conjunto de pares de valores X e Y , obtendo-se a equação da reta ($Y = AX + C$). No ensaio de flexão em três pontos, os valores de Y e X são expressos como:

$$Y = \left(\frac{b \cdot t}{p \cdot o}\right)^2 \quad X = b \quad (2)$$

Sendo que, b corresponde à altura da viga, t é a espessura e P^o a carga máxima obtida nos ensaios somada com o valor do peso próprio entre os apoios da viga.

4. Resultados e análise

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade são apresentados na tabela [4], assim como as variáveis de interesse consideradas em cada um dos tipos de CAA, juntamente com os valores da energia de fratura (G_f) e do tamanho da zona de processo de fratura (c_f). A dispersão dos resultados da regressão linear, obtidos foi avaliada pelos índices w_A , w_C e m , também é apresentada na tabela [4]. Sendo w_A a dispersão da inclinação da regressão linear, w_C o coeficiente de variação que intercepta a linha de regressão e m a largura relativa da faixa de dispersão.

Na tabela [4], observa-se que as resistências à compressão do V30d12F e do A30d12F apresentaram valores semelhantes, assim como do V30d20G e do A30d20G. As resistências à compressão do V30d12F e do A30d12F foram, em média, 54% superiores às do V30d20G e do A30d20G. Isto se deve à granulometria mais fina usada no V30d12F e no A30d12F em relação ao V30d20G e ao A30d20G. A granulometria mais fina proporciona um melhor preenchimento dos poros presentes na interface entre agregado e pasta, aumentando com isto a aderência entre a pasta de cimento e os agregados.

Na tabela [4], nota-se a boa correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, com tendência de aumento do módulo de elasticidade com o incremento da resistência à compressão, tanto nos CCV quanto nos CAA, que é um fato bem conhecido na literatura sobre o assunto. Em geral, os valores de

módulo de elasticidade dos CCV foram superiores aos dos CAA, devido à menor quantidade de agregados graúdos presentes no CAA e à ausência de adições minerais com propriedades aglutinantes. A diferença entre o módulo de elasticidade dos CCV e dos CAA foi aproximadamente 8% nos concretos cuja resistência alvo de dosagem à compressão foi de 30 MPa. Esta diferença diminui para cerca de 2% nos concretos cuja resistência alvo de dosagem à compressão foi de 50 MPa.

Na tabela [4], observa-se que a energia de fratura do concreto V30d20G foi superior à do V30d12F em aproximadamente 12%, enquanto a energia de fratura do V50d20F foi 50% superior à do V50d12G. Nos concretos autoadensáveis, o A30d12F apresentou valor de energia de fratura 33% maior do que a do A30d20G, e o A50d12G apresentou valor de G_f 77% superior à do A50d20F. Observa-se também, que os CAA apresentaram valores de energia de fratura inferiores aos dos CCV correspondentes. A única exceção foi o A50d12G, que apresentou energia de fratura equivalente à do V50d12G.

Os resultados apresentados na tabela [4] mostraram que os valores dos CCV, considerando a dispersão da inclinação da regressão linear (w_A) e do coeficiente de variação que intercepta a linha de regressão (w_C), apresentaram-se pouco acima do sugerido pela recomendação TC 89-FMT [5]. A largura relativa da faixa de dispersão (m) mostrou-se satisfatória. Nos CAA todos os coeficientes de dispersão, w_A , w_C e m , apresentaram valores inferiores aos sugeridos pela metodologia, exceto os coeficientes para o concreto tipo A50d20F, que apresentaram valores superiores em relação aos recomendados pela metodologia. Isto pode indicar o melhor controle tecnológico do processo de concretagem dos CAA em relação aos CCV, devido, principalmente, a ausência de vibração destes concretos.

Em geral, os valores do comprimento da ZPF de fratura dos CAA foram significativamente menores do que os valores correspondentes dos CCV. Isto pode ser explicado pelo fato da utilização de uma maior quantidade de finos nos CAA, que tende a melhorar as propriedades da interface entre agregado e pasta, gerando uma maior ruptura de grãos de agregado durante a propagação da trinca (figura [4]), conseqüentemente, os valores do comprimento da ZPF de fratura dos CAA diminuíram, devido à menor tortuosidade do caminho de propagação da trinca.

Tabela 4
Características e propriedades mecânicas dos concretos

Tipos de concreto	Resistência à compressão f_c (MPa)	Resistência à tração f_t (MPa)	Módulo de elasticidade E (MPa)	w_A	w_C	m	G_f (N/m)	c_f (mm)
V30d12F	47,0	3,88	31.644	0,76	0,36	0,42	32,36	36,21
V30d20G	29,8	4,24	27.980	0,79	0,97	0,84	36,39	36,01
V50d12G	48,3	3,25	30.326	0,29	0,31	0,26	22,31	15,63
V50d20F	49,2	5,09	31.574	0,77	0,36	0,39	33,65	34,68
A30d12F	45,7	4,16	29.219	0,057	0,09	0,065	18,50	9,10
A30d20G	30,5	3,54	26.104	0,17	0,13	0,13	13,90	18,18
A50d12G	52,4	4,37	29.748	0,087	0,11	0,087	22,63	13,23
A50d20F	60,2	4,85	31.188	0,17	0,35	0,20	12,78	8,28

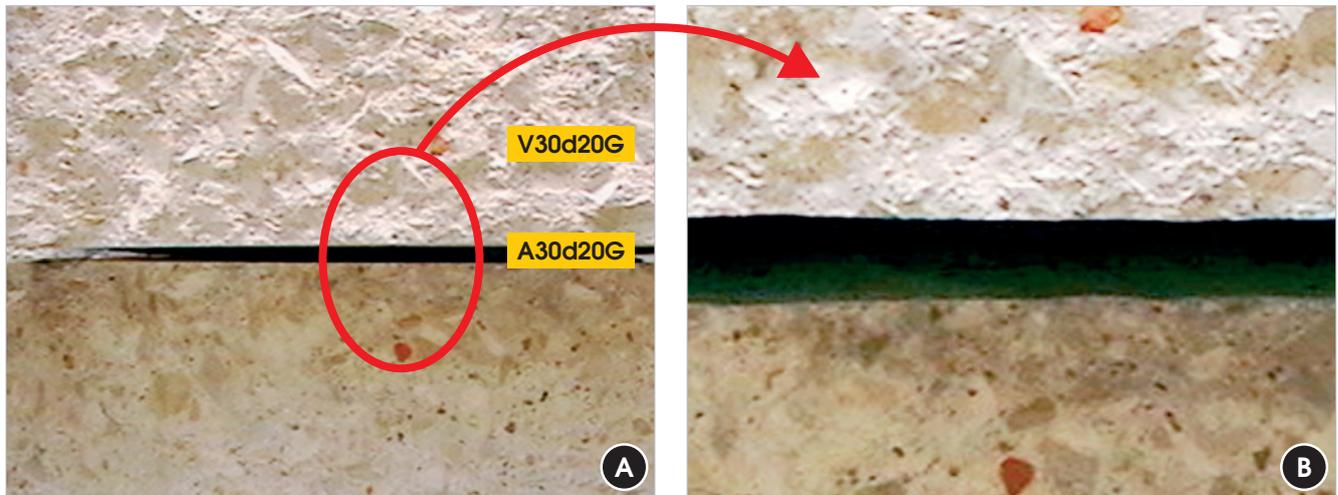


Figura 4
 (a) superfície de ruptura do CCV (acima) e do CAA (debaixo) (b) detalhe ampliado

A figura [4] mostra a superfície de fratura de uma viga do V30d20G (parte superior da foto) em comparação à superfície de fratura de uma viga do A30d20G (parte inferior da foto). Nota-se na figura [4], que o V30d20G apresenta uma superfície de fratura mais rugosa, caracterizada, principalmente, pela propagação da trinca através da interface agregado-pasta de cimento, contornando a superfície dos agregados. Por outro lado, no A30d20G, a superfície de fratura apresenta-se mais lisa, notando-se grande incidência de fratura dos grãos de agregado durante a propagação da trinca. Desta forma, tanto os valores da energia de fratura, quanto o comprimento da ZPF dos CAA foram menores do que os dos CCV (tabela [4]). A maior ruptura de grãos de agregado ocorrida nos CAA deve-se, principalmente, ao fortalecimento da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento, tendo em conta que nestes concretos a quantidade de finos presentes é maior. Em geral, os CCV apresentaram valores de energia de fratura e do comprimento da ZPF superiores aos dos CAA. Nota-se, que a quantidade de finos

pode estar diretamente relacionada com o tamanho da ZPF, e que a composição granulométrica influencia nos valores da energia de fratura, juntamente com a quantidade de finos presentes nos concretos.

Analisou-se a influência da composição granulométrica e do diâmetro máximo do agregado no comprimento da ZPF, por meio do gráfico de efeito de tamanho (figura [5]). A resistência das estruturas de concreto diminuiu, em consequência do respectivo aumento de tamanho da estrutura. Em geral, as estruturas tendem a ter um comportamento mais frágil com o aumento de suas dimensões, o que é descrito como sendo o efeito de tamanho e pode ser explicado com base nos fundamentos da Mecânica da Fratura. Nota-se na figura [5], o declínio da resistência nominal com o incremento do tamanho do corpo-de-prova. O declínio observado no trabalho do tamanho do corpo-de-prova. O declínio observado no trabalho é inferior a $-1/2$, que corresponde à mecânica da fratura elástica linear (MFEL). Na mesma figura apresenta-se também uma faixa correspondente à mecânica da fratura não-linear (MFNL).

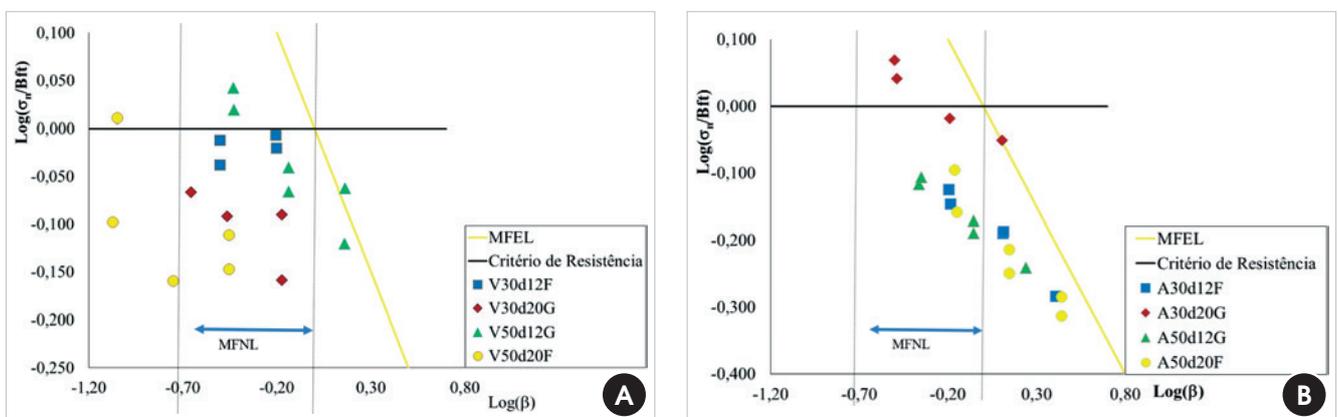


Figura 5
 (a) Efeito de tamanho dos CCV; (b) Efeito de tamanho dos CAA

O efeito de tamanho pode ser analisado através do gráfico bi-logarítmico, logaritmo da resistência nominal de fratura, $\sigma_{N'}$ dividida por uma constante empírica, B , multiplicada pela resistência à tração, f_t , - ($\sigma_{N'}/Bf_t$) versus logaritmo de β , que é a altura da viga dividida pelo comprimento característico. A constante empírica, B , é calculada em função do valor de C da reta de regressão linear; e β é o índice de fragilidade do material. Nota-se, através da figura [5], que nos exemplares menores, a tensão de falha é proporcional à prevista pelos critérios dados pela teoria da resistência dos materiais. Neste caso, um critério clássico de resistência pode ser aplicado para se analisar o comportamento destes exemplares. A linha horizontal na figura [5] representa um critério de resistência clássico baseado em tensão. As estruturas com grandes dimensões apresentam de forma mais intensa o efeito de tamanho, isto é, a resistência do material na falha é proporcional à dimensão característica do material e corresponde à MFEL clássica, representada pela reta com inclinação de $-1/2$ em relação ao eixo horizontal. Na região de interseção entre estas duas retas, isto é, interseção entre o critério de resistência clássico e o critério baseado na MFEL, ocorre uma zona de transição, onde deve-se adotar mecânica da fratura não-linear (MFNL). Os resultados da maioria dos testes com corpos-de-prova de concreto na presente pesquisa experimental situam-se nesta zona de transição (figura[5]).

Observa-se na figura [5a], que o V50d12G, dentre os CCV, é o que se encontra mais próximo à reta da MFEL, apresentando comportamento mais frágil e o menor tamanho da ZPF, conforme resultados da energia de fatura e do comprimento da ZPF apresentados na tabela [4].

Dentre os CCA, o A50d20F apresentou o comportamento mais frágil, aproximando-se de forma mais significativa da reta da MFEL (figura [5b]) e também observando os valores de G_f e c_f da tabela [4]. Em geral, os CAA apresentaram comportamentos mais frágeis que os CCV. Ao serem comparados o A30d12F com o V30d12F, e o A50d20F com o V50d20F, nota-se que a adição de finos nos autoadensáveis, melhorou as propriedades da interface entre agregado e pasta destes concretos, tornando-os mais frágeis.

Nos CAA, comparando-se o A30d12F com A30d20G, nota-se que o aumento da granulometria associado com aumento do diâmetro máximo do agregado produziu uma redução de 25% no valor de G_f e aumento de aproximadamente 100% no valor de c_f . Por outro lado, a comparação do A50d12G com A50d20F mostra que a redução da granulometria associada com aumento do diâmetro máximo produziu uma redução de 43,5 % no valor de G_f e redução de 37% no valor de c_f .

A adição de finos ao concreto melhora as propriedades da interface, deixando o concreto mais frágil, tendo sido observada uma maior incidência de ruptura de grãos de agregado durante a propagação das trincas. Isto pode ser observado comparando-se os CAA com os CCV.

5. Conclusões

A partir dos procedimentos de ensaios utilizados e dos resultados obtidos pode se ter as seguintes ilações:

- A metodologia para se determinar os parâmetros de fratura dos CCV e dos CAA, com base na especificação RILEM TC 89-FMT, fundamentada no Método do Efeito de Tamanho, mostrou-se adequada para utilização rotineira visando à caracterização dos concretos com base nos fundamentos da mecânica da fratura, pois baseia-se num sistema de aplicação de carga simples, necessitando apenas da obtenção da carga máxima durante o ensaio, sem a necessidade de utilização de máquina servo-controlada. Portanto, esta é uma metodologia

perfeitamente viável para caracterização do concreto no ambiente de laboratórios razoavelmente equipados, com relação aos aspectos de amolecimento e de fragilidade estrutural, a partir das estimativas das propriedades: energia de fratura e tamanho da zona de processo de fratura.

- Os CAA estudados em geral apresentaram valores mais baixos de energia de fratura que os CCV correspondentes, como comprovado pelos resultados do Método do Efeito de Tamanho, por meio da especificação RILEM TC 89-FMT. Esse comportamento mais frágil está relacionado à melhoria das propriedades da interface, devido à utilização de uma composição granulométrica com mais finos no caso dos CAA do que no caso dos CCV.
- A utilização da areia artificial na confecção dos CAA, visando aumentar a quantidade de finos, demonstrou ser bastante eficaz, possibilitando a redução do custo de produção destes dois tipos de concreto.
- Os CCV e os CAA apresentaram comportamentos equivalentes, considerando-se a resistência à compressão, que foi influenciada significativamente pela granulometria. O uso de granulometria mais fina proporcionou incremento dos valores de resistência à compressão. Os módulos de elasticidade dos CAA estudados foram ligeiramente menores do que os módulos de elasticidade dos CCV de referência, para um mesmo nível de resistência à compressão. Entretanto, esta ligeira redução observada para o módulo de elasticidade pode ser recompensada pelo aumento da produtividade dos CAA e pela melhoria do processo construtivo, comprovada pelos menores valores dos coeficientes de variação nos resultados obtidos para os CAA em comparação aos resultados dos CCV.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos órgãos do Ministério da Educação do Brasil, CAPES, CNPq e FAPEMIG. E ao Ministério de Educación y Ciencia. Proyecto PH2007-0044-PC y Proyecto PCI2006-A7-0721. Programa CGCI MECD-DGU Brasil/Espanha.

7. Referências

- [1] BITTENCOURT, T. N., Fratura do Concreto Estrutural: Aspectos Teóricos Computacionais e suas Aplicações [Fracture of Structural Concrete: Computational Theoretical Aspects and their Applications] Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- [2] BAŽANT, Z.P.; Size effect in blunt fracture concrete, rock end metal. J. Eng. Mech-ASCE, 110:518-35, 1984.
- [3] BAŽANT, Z.P.; Concrete fracture models: testing and practice. Engineering Fracture Mechanics. 2002, v.69, 165-205.
- [4] BAZANT, Z. P.; PLANAS, J.; Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-Brittle Materials, 1998, CRC Press.
- [5] Serna, P., Taengua, E.G.; Líneas básicas del diseño y análisis de experimentos. Dpto. de Ing. de la Construcción y Proyectos de Ing. Civil Universitat Politècnica de València.
- [6] RILEM - "Draft Recommendation 89-FMC: Size-effect methods for determining fracture energy and process zone size of concrete", Materials and Structure, 1990, v.23, p.461-465.
- [7] BAZANT, Z. P.; PFEIFFER, P. A.; Determination of Fracture Energy from Size Effect and Brittleness Number. ACI Materials Journal, 1987, v. 84, pp. 463-480.