

# Variability of the bond and mechanical properties of self-compacting concrete

## Variabilidade da aderência e das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável



F. M. ALMEIDA FILHO<sup>a</sup>  
ffilho@sc.usp.br

B. E. BARRAGÁN<sup>b</sup>  
bryan.barragan@upc.edu

J. R. CASAS<sup>c</sup>  
joan.ramon.casas@upc.edu

A. L. H. C. EL DEBS<sup>d</sup>  
analucia@sc.usp.br

### Abstract

This main objective of this research is to evaluate the variability of the mechanical properties (compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength) and bond strength of the self-compacting concrete (SCC), with 50 MPa compressive strength at 28 days, varying the maximum aggregate size and the SCC fluidity. The tests were made in 15 x 30 cm concrete cylinders and in beams standardized by Rilem-Ceb-Fib (1973). In agreement with the obtained results, can be concluded that the variability of the self-compacting concrete is small for the modulus of elasticity and for the compressive strength, but the tensile strength presented a significant variability due to the failure mode. About the bond strength, the variability was small showing that the self-compacting concrete is reliable and possesses great potential for use in the civil construction.

**Keywords:** Self-compacting concrete, variability, hardened state, steel-concrete bond, beams, statistical analysis.

### Resumo

Esta pesquisa tem como objetivo estudar a variabilidade das propriedades mecânicas (resistência à compressão, módulo de elasticidade longitudinal e resistência à tração) e da resistência de aderência do concreto auto-adensável (CAA), com resistência à compressão do concreto de 50 MPa aos 28 dias, variando o tamanho máximo do agregado graúdo e sua fluidez. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova de 15 x 30 cm e em vigas padronizadas de acordo com o Rilem-Ceb-Fib (1973). De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a variabilidade do concreto auto-adensável é pequena para o módulo de elasticidade e para a resistência à compressão e grande para a resistência à tração por causa do modo de ruptura do modelo. Com relação à resistência de aderência, a variabilidade foi pequena mostrando que o concreto auto-adensável é material confiável com grande potencial de utilização no mercado da construção civil.

**Palavras-chave:** concreto auto-adensável, variabilidade, estado endurecido, aderência aço-concreto, vigas, análise estatística.

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, ffilho@sc.usp.br, 13566-590, São Carlos, Brasil

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería de la Construcción, ETSECCPB-UPC/Barcelona, bryan.barragan@upc.edu, Barcelona, Espanha

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería de la Construcción, ETSECCPB-UPC/Barcelona, joan.ramon.casas@upc.edu, Barcelona, Espanha

<sup>d</sup> Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, analucia@sc.usp.br, 13566-590, São Carlos, Brasil

## 1. Introdução

Com o passar dos anos, houve um grande desenvolvimento tecnológico dos materiais empregados na construção civil, criando concretos de alto desempenho e que não precisam de compactação mecânica. Assim, o concreto auto-adensável (CAA) teve sua origem na necessidade de estruturas mais duráveis e que não solicitassem o trabalho da compactação mecânica, por causa do alto custo e perda de tempo desse serviço.

As principais vantagens do CAA são a redução do tempo de construção e custo da obra; a melhoria a qualidade do concreto, da segurança e saúde dos operários; a possibilidade de maiores taxas de armadura; e a melhoria da tecnologia do processo construtivo [1-2]. Como desvantagens, o concreto auto-adensável necessita de um maior controle de qualidade dos materiais utilizados (areia, brita, filler, aditivos e cimento) e do seu traço, pois suas propriedades no estado fresco podem sofrer modificações como o excesso de fluidez, segregação ou excesso de coesão.

Assim, o CAA pode ser definido como um concreto capaz de fluir dentro de uma forma, passando por suas armaduras e preenchendo todas as suas partes, por efeito de seu peso-próprio, sem utilizar nenhum tipo de equipamento de adensamento mecânico, podendo o CAA ser classificado como material de construção avançado. Sua composição inclui materiais inorgânicos de granulação fina, oferecendo a possibilidade de utilização de pós de finos (muitas vezes considerado rejeito) que não possuem nenhuma aplicação na indústria [3-4].

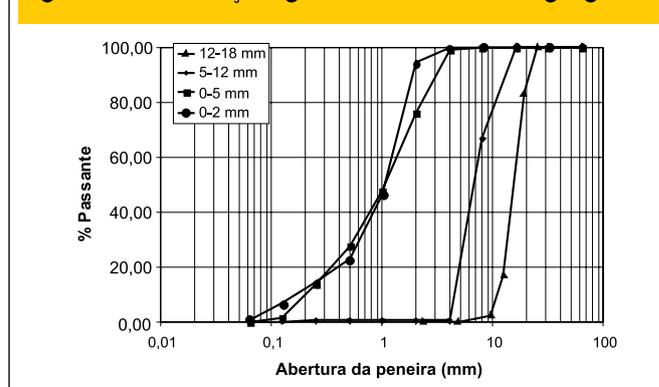
As propriedades mecânicas do CAA são alvo de extensas pesquisas experimentais, uma vez que por ser um material que dispensa o uso de vibração e sua qualidade se baseia em sua capacidade de deformabilidade e de resistência à segregação. Dessa forma, o estudo e a comprovação física se tornam indispensáveis para uso seguro do CAA na construção civil [5-7].

Com relação à variabilidade das propriedades dos materiais, hoje em dia é cada dia maior esse interesse. Esses estudos necessitam de uma quantidade considerável de repetições para que se tenha uma maior representatividade do fenômeno a ser estudado.

Para os estudos de variabilidade, são utilizados desde processos estatísticos mais simples (média, desvio padrão e coeficiente de variação) até os mais complexos como a análise de variância, o qual permite uma melhor avaliação dos parâmetros mais importantes e que tem influência no material.

A aplicação dos processos estatísticos para avaliação do comportamento dos materiais foi sempre tema de investigações experimentais,

Figura 1 – Distribuição granulométrica dos agregados



mas com conclusões muitas vezes contraditórias. Isso ocorria por causa da má utilização do processo estatístico para os resultados obtidos, ou seja, às vezes ou não havia resultados suficientes (ou mais precisamente, havia a falta de uma quantidade significativa de réplicas de um mesmo modelo para avaliar a repetição do resultado) ou o procedimento estatístico utilizado não era adequado para aquela análise.

As desvantagens desses processos são que, a média e o desvio padrão necessitam uma quantidade grande de amostras para que não ocorram variações significativas. Para a análise da variância, a principal desvantagem é que este processo necessita uma análise mais detalhada dos parâmetros que possuem maior influência no resultado.

### 1.1 Objetivos e Justificativa

O objetivo principal deste projeto foi obter informações a respeito da variabilidade das propriedades do concreto auto-adensável no estado endurecido. Os parâmetros a serem analisados foram abordados de um ponto de vista estatístico (média, desvio padrão, coeficiente de variação, distribuição normal e frequência).

Para o estado endurecido a ênfase foi dada análise da variabilidade das propriedades mecânicas do CAA aos 28 dias, notadamente: resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração com a modificação do tamanho máximo do agregado graúdo e, ainda foi abordada a variabilidade da aderência aço-concreto, através de ensaios de vigas padronizadas pelo Rilem [8]. Os ensaios foram conduzidos no *Laboratório de Tecnología de Estructuras de Ingeniería de la Construcción* (ETSECCPB-UPC/Barcelona).

Atualmente, ainda há certa relutância na utilização do concreto auto-adensável em função de sua origem recente (Japão, 1988 [1]), o que o torna um material com pouca divulgação sobre sua utilização e pela falta de dados experimentais e também de aplicações que afirmem sua segurança e a qualidade.

De acordo com a literatura técnica, pouca atenção foi dada à variabilidade das propriedades do concreto convencional, sendo que somente algumas pesquisas contemplaram seu estudo, algumas para concreto com a presença de fibras [9-13] e outras com ênfase na caracterização dos seus parâmetros reológicos [14-17]. Desse modo, a justificativa para esta pesquisa é a ausência de informações a respeito da variabilidade das propriedades mecânicas do CAA e da aderência aço-concreto no ensaio de viga. Desse modo, espera-se que os resultados obtidos possam fornecer uma base de dados que mostre

Tabela 1 – Limites estabelecidos para o critério de qualidade

Controle de qualidade	Limites aceitos para o desvio padrão (18) ( $f_c > 27 \text{ MPa}$ )	Limites aceitos para o coeficiente de variação
A (excelente)	2,7	10%
B (médio)	4,0	15%
C (pobre)	5,4	20%

**Tabela 2 – Composição dos traços em CAA**

	CAA1	CAA2	CAA3
$V_{\text{pasta}}$ (%)	38%	34,5%	35%
Índice de vazios (%)	29,2%	27,4%	27,4%
Cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	362,5	329,0	333,8
Água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	181,3	164,8	166,9
Superplastificante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	6,2	5,6	5,7
Filler ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	108,7	98,7	100,1
Areia 1 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	710,9	607,1	602,5
Areia 2 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	397,8	339,7	337,1
Brita 1 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	525,9	450,7	447,3
Brita 2 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	-	330,0	328,5
<b>Ensaio</b>			
Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ ) =	22	22	23
Umidade (%) =	66	78	66
<b>Espalhamento</b>			
$T_{50}$ (s) =	1,0	1,5	1,0
$D_e$ (cm) =	74,0	57,0	74,0
<b>Caixa-L</b>			
$T_{60}$ (s) =	1,0	3,0	1,0
CB =	1,0	0,7	0,95
<b>Funil-V</b>			
$T_v$ (s) =	2,5	5,5	5,0
<b>Anel-J</b>			
$T_{50}$ (s) =	1,0	2,0	1,0
$D_j$ (cm) =	74,25	55,5	73,5
CB =	1,0	0,77	1,0
<b>Densidade</b>			
$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2400,41	2420,95	2425,21

que o grau de confiança na utilização do CAA é tão elevado quanto o do concreto convencional utilizado para a construção civil.

### 1.2 Critérios para análise dos resultados

Para se ter um alto nível de qualidade, é preciso que se estabeleçam parâmetros para se determinar a variação da propriedade que se quer avaliar. Esta avaliação pode ser realizada por meio do desvio padrão (D.P.) e do coeficiente de variação (C.V.). O desvio padrão é o mais utilizado [18], mas o coeficiente de variação apresenta um melhor entendimento e facilidade de visualização, pois ela não depende da magnitude da propriedade medida. A Tabela 1 mostra os critérios estabelecidos para esta investigação.

A justificativa para a adoção do coeficiente de variação para esta pesquisa é a ausência de informações a respeito dos limites do desvio padrão para o módulo de elasticidade e a resistência à tração, pois o controle de qualidade utilizado se baseia somente na variação da resistência à compressão do concreto.

### 1.3 Parâmetros estatísticos analisados

Os parâmetros estatísticos utilizados para se avaliar a variabilidade das propriedades do CAA incluem a média (M), o desvio padrão (D.P.), o coeficiente de variação (C.V.) e a análise do intervalo de confiança (I.C.) [19].

Mais de dez resultados (oito no caso do estudo da resistência de aderência) de um mesmo concreto foram analisados para a determinação de cada um desses parâmetros. Ainda, uma análise da frequência e da distribuição normal probabilística foi desenvolvida para o módulo de elasticidade e para a resistência de aderência. Vale comentar que esse estudo da variabilidade do CAA foi uma abordagem pioneira no sentido de se avaliar e quantificar o nível de variação das propriedades mecânicas do CAA e, por isso, foram analisadas três dosagens de CAA como estudo inicial.

## 2. Variabilidade das propriedades mecânicas do CAA

O método de dosagem utilizado foi o da otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular dos agregados [3]. Esse

**Tabela 3 – Variabilidade do CAA1 aos 28 dias**

CP	$E_{cm}$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
1	36143,00	47,70	
2	38256,50	48,59	
3	36387,00	46,56	
4	37050,50	42,38	
5	36076,00	45,54	
6	35581,00	47,39	
7	36932,00	47,19	
8	37389,50	45,75	
9	36485,00	49,10	
10	37211,50	47,98	
11	35670,50	41,90	
12	36862,50		4,40
13	36504,50		2,64
14	36949,00		3,95
15	36183,50		4,06
16	35176,50		2,81
17	37292,00		3,38
18	35570,50		3,67
19	36416,00		4,45
20	36141,50		3,96
21	36514,00		4,00
22	35315,50		3,65
M	36459,45	46,37	3,72
D.P.	752,90	2,36	0,58
C.V. (%)	2,07%	5,08%	15,69%

**Tabela 4 – Variabilidade do CAA2 aos 28 dias**

CP	$E_{cm}$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
1	39090.50	50.50	
2	39667.50	48.23	
3	40587.00	42.74*	
4	38570.00	50.70	
5	38323.50	50.62	
6	38612.50	50.62	
7	38389.00	49.21	
8	39285.50	49.48	
9	38860.00	49.59	
10	37984.00	40.98*	
11	38031.50	49.85	
12	39148.50	49.60	
13	38762.50		3.42
14	31483.00*		3.40
15	39736.00		3.27
16	31373.50*		4.45
17	40089.50		4.25
18	39332.50		3.57
19	39511.50		4.19
20	38915.00		3.17
21	38245.50		3.61
22	38982.00		3.80
23	38605.50		4.09
24	38894.50		3.51
M	38982.90	49.84	3.73
D.P.	659.22	0.79	0.42
C.V. (%)	1,69%	1,59%	11,32%

processo de otimização leva em consideração o teor de superplastificante e a quantidade de filler adicionado, levando em consideração a relação água-cimento. A otimização do esqueleto granular consiste em obter a maior massa unitária, ou seja, o menor índice de vazios, onde o procedimento para essa obtenção se baseia no processo de compactação seca, sem a necessidade de compactação dos agregados, uma vez que essa compactação não existe no CAA [3].

O cimento utilizado foi o CEM II 42.5 (correspondente a um cimento CP II), com o objetivo de se obter um CAA de resistência a compressão cerca de 50 MPa aos 28 dias. O filler e os agregados eram de origem calcária com diâmetro de partícula inferior a 0,125  $\mu\text{m}$  [20]. A Figura 1 mostra a distribuição granulométrica dos agregados.

O aditivo superplastificante utilizado foi o Glenium C303 SCC, baseado em cadeias de polycarboxilato. Foram utilizadas duas areias (areia 1 e areia 2) com diâmetros de 0-2 mm e 0-5mm, respectivamente, e 2 britas (brita 1 e brita 2) com diâmetros de 5-12 mm e 12-18 mm, respectivamente.

Foram realizados ensaios em 30 corpos-de-prova por concreto, onde foi obedecido o critério de aceitação do CAA, com a peculiaridade de um dos CAA ser muito coeso e, por isso, apresentar pouca fluidez.

A Tabela 2 mostra a composição de cada CAA e suas propriedades no estado fresco.

### 2.1 Ensaios dos corpos-de-prova

Todos os corpos-de-prova foram levados a uma câmara úmida (90%<UR<95%) por 27 dias, sendo depois capeados para ensaio. Os ensaios foram realizados com uma máquina de ensaios Iber-test. Vale salientar que os valores mostrados para o CAA1, CAA2 e CAA3 já passaram por um tratamento estatístico para eliminação daqueles que, de acordo com o diagrama em papel probabilístico, estavam fora da distribuição normal.

A Tabela 3, 4 e Tabela 5 mostram os resultados para o CAA1, CAA2 e CAA3 no estado endurecido, respectivamente.

A Figura 2, 3 e 4 mostram os resultados referentes ao módulo de elasticidade comparados com os valores de resistência à compressão e à tração de cada série.

### 3. Variabilidade da resistência de aderência do CAA

De acordo as análises experimentais do CAA de baixa resistência, espera-se que a sua utilização melhore o comportamento na flexão e a capacidade de carregamento de elementos estruturais por causa da melhor capacidade de preenchimento do CAA que aumenta, diretamente a aderência entre os materiais aço e concreto e, indiretamente,

**Tabela 5 – Variabilidade do CAA3 aos 28 dias**

CP	$E_{cm}$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
1	37856.50	44.47	
2	37745.00	43.34	
3	37953.00	38.08	
4	38776.50	43.53	
5	38238.50	42.82	
6	36497.50	43.46	
7	38449.00	45.99	
8	38039.50	39.72	
9	38821.00	41.19	
10	38095.00	43.47	
11	36728.00		3.75
12	38539.00		2.74
13	37612.50		2.44
14	39217.50		3.05
15	36765.00		2.47
16	35354.50		3.10
17	39695.00		3.59
18	39551.50		3.94
19	38669.00		3.12
20	37154.00		3.36
M	37987.88	42.61	3.16
D.P.	1085.72	2.33	0.51
C.V. (%)	2,86%	5,46%	16,25%

o efeito do confinamento das armaduras laterais ou estribos. Quando se compara o CC com o CAA, para baixas resistências à compressão, estes possuem tensões de aderência similares com algumas peculiaridades para o CAA [21-23]. Além disso, em locais com alta taxa de armadura as vantagens citadas anteriormente do CAA se sobressaem sob CC [24].

[21-22] realizaram estudos experimentais a respeito da aderência entre barras de aço e o CAA em modelos de arrancamento de barras comparando-os com modelos em CC de mesmas características. Como resultados, os referidos autores avaliaram que existe certa ductilidade no comportamento pós-pico da tensão de aderência, sendo esta caracterizada por um deslizamento acompanhando de uma perda de tensão de aderência muito pequena. [25] observaram a influência da posição da armadura na interface aço-CAA, onde, avaliaram barras na direção vertical e horizontal,

**Tabela - 6 Propriedades mecânicas do CAA de cada série aos 28 dias**

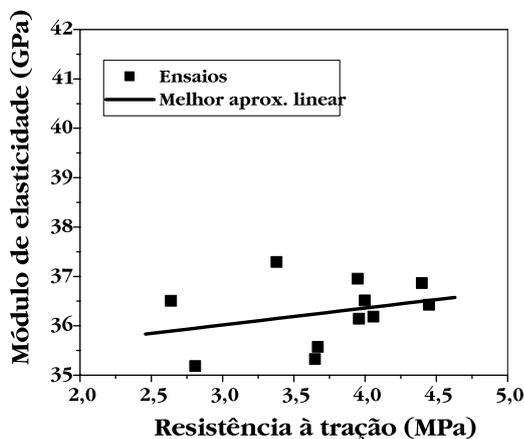
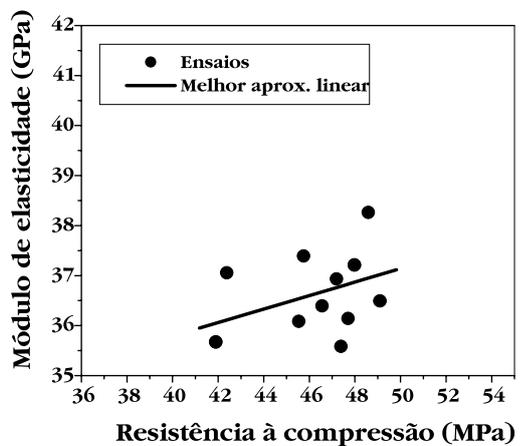
	CAA1	CAA2	CAA3
$f_{c,28}$ (MPa)	51.77	52.61	53.75
$E_{c,28}$ (GPa)	37.31	35.91	38.41
$f_{t,28}$ (MPa)	3.10	3.23	2.28

mostrando que o CAA apresentava melhor adesão em relação ao CC, e o desempenho quando lançado na direção vertical era similar ao CC.

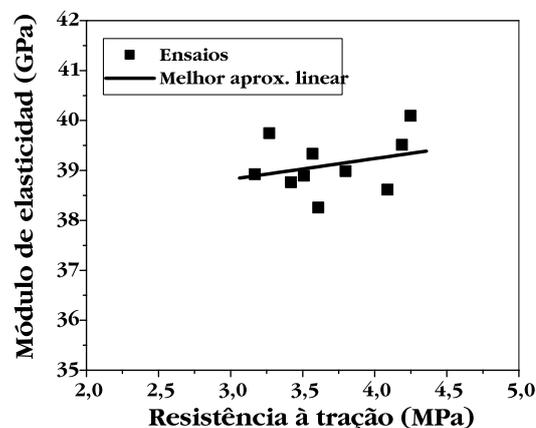
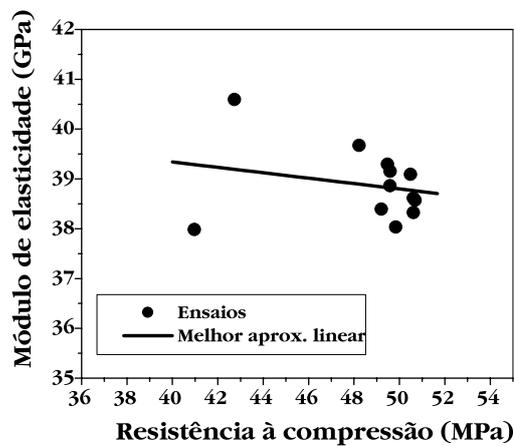
[26] estudaram o fenômeno da aderência em vigas com concreto auto-adensável comparadas a concretos convencionais de mesma resistência à compressão. Foi utilizada como modelo de viga uma adaptação do modelo de viga do Rilem para

barras de armadura inferiores a 16 mm de diâmetro. Segundo os autores, esta opção foi em função de se adequar às fôrmas existentes em laboratório. De acordo com os referidos autores, a principal conclusão foi que os modelos de viga tinham ruptura devida à força cortante e, dessa forma, a ruptura era do tipo frágil. De acordo com os autores, a característica observada por [27], ocorre por causa da alta quantidade de finos presentes na mistura, o que, diminui a resistência de aderência. Ainda, os CAA quando corretamente do-

**Figura 2 - Variabilidade das propriedades no estado endurecido para o CAA1**



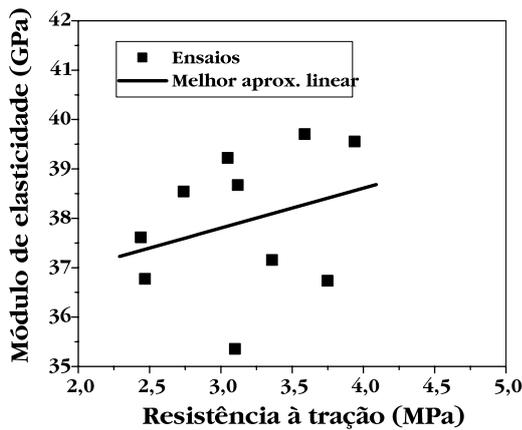
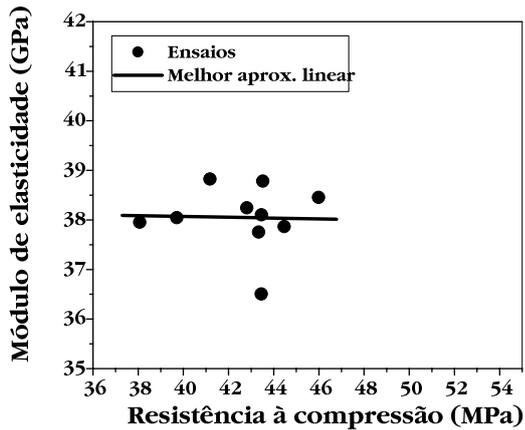
**Figura 3 - Variabilidade das propriedades no estado endurecido para o CAA2**



sados, apresentam valores de resistência de aderência da mesma ordem de grandeza que o concreto comum, sendo que o CAA apresenta ruptura do tipo frágil, necessitando então de recomendações

específicas. Como recomendações, os referidos autores comentam a necessidade de estimular a utilização de CAA para aumentar a durabilidade e sua utilização no reparo de estruturas degradadas. De acordo com observações realizadas, se percebe que quando da utilização de concretos de alta resistência à compressão, poderá ocorrer ruptura frágil na interface aço-concreto. O que ocorre é que o CAA possui uma capacidade de melhor preenchimento das fôrmas e, conseqüentemente, melhor envolvimento das barras de aço da estrutura. Isso, melhoraria diretamente a resistência de aderência pois ocorreria um acréscimo na adesão e no atrito da barra de aço com o concreto e, portanto, aumentaria a probabilidade de ruptura brusca da interface aço-concreto. [28-30] realizaram um estudo preliminar sobre a resistência de aderência em modelos de arrancamento, de acordo com o Rilem [8], utilizando concretos auto-adensáveis e convencionais de mesma resistência à compressão. De acordo com os resultados observados, o comportamento da resistência de aderência do CAA é similar ao do CC, e, em alguns casos a resistência de aderência do CAA foi superior ao do CC. Ao contrário de [26], o tipo de concreto (auto-adensável ou convencional) não possui influência no modo de ruptura do prisma de concreto, uma vez que a resistência à compressão seja a mesma.

**Figura 4 – Variabilidade das propriedades no estado endurecido para o CAA3**



**Tabela 7 – Força de ruptura e flecha máxima dos modelos de cada viga de cada série**

CAA1		CAA2		CAA3	
$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$P_u$ (kN)	$d_u$ (mm)
---	---	85.26	17.02	88.32	24.92
86.71	22.67	83.35	13.82	92.03	28.44
85.99	18.38	88.90	25.15	92.85	25.63
92.33	29.68	84.43	26.48	90.74	25.55
82.12	25.86	89.88	25.93	98.42	25.43
85.44	28.74	83.63	25.34	88.17	22.92
99.22	23.72	84.13	24.64	86.00	26.82
92.49	28.33	88.62	23.38	92.61	21.52

**Figure 5 – Dimensions of the used bean for the bond stress test (in cm.)**

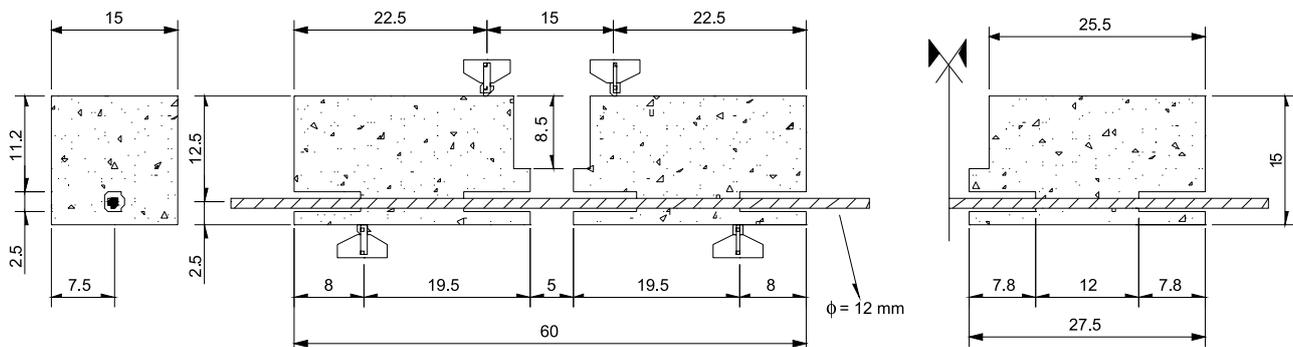


Figura 6 - Variabilidade da tensão de aderência para as séries CAA1, CAA2 e CAA3

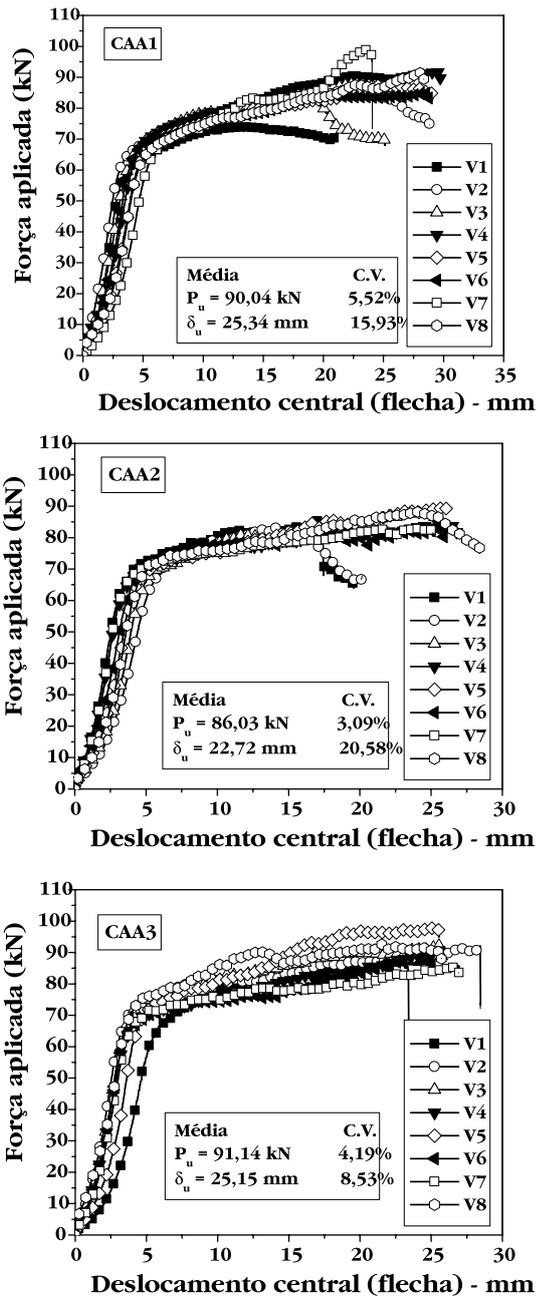
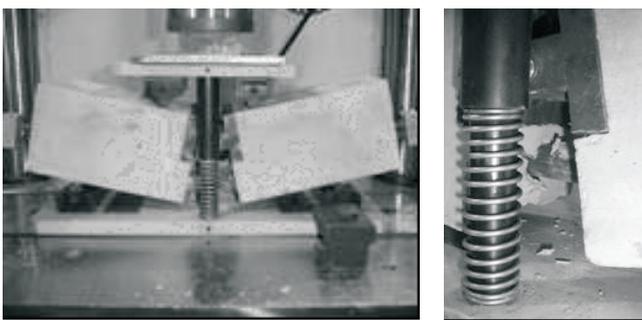


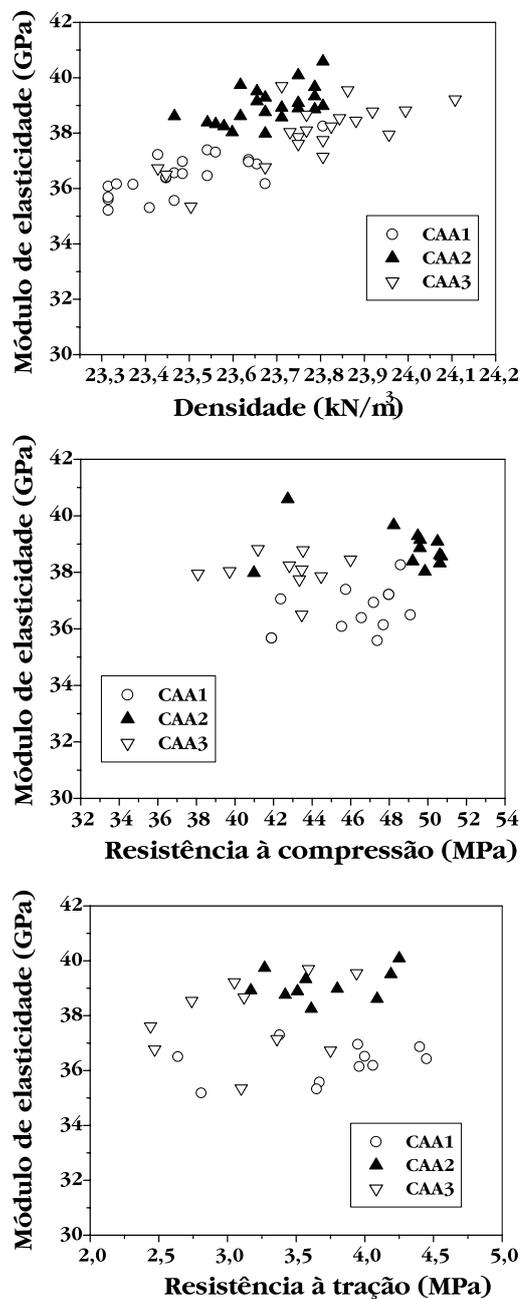
Figura 7 - Ensaio do modelo de viga e modo de ruptura



### 3.1 Ensaios de viga

Os ensaios para avaliação da resistência de aderência foram desenvolvidos com modelos de viga, em fôrmas de aço, disponíveis no *Laboratório de Tecnologia de Estruturas*. Para cada série de ensaios foram moldadas 8 vigas, conforme a Figura 5.

Figura 8 - Variação do módulo de elasticidade com relação à densidade, a resistência à compressão e à tração de cada CP



**Tabela 8 – Intervalo de confiança (IC) para o módulo de elasticidade**

	CAA1	CAA2	CAA3
M (GPa)	34,46	38,98	37,99
D.P. (GPa)	0,75	0,66	1,08
Graus de liberdade	21	21	19
Limite inferior (GPa)	34,90	37,61	35,73
Limite superior (GPa)	38,02	40,35	40,19

Figura 5 Dimensões das vigas para ensaio de resistência de aderência (dimensões em cm)

A armadura para as vigas foi a mesma estabelecida pelo Rilem [8] e [31] com uma pequena modificação na altura da armadura para respeitar o cobrimento de 1 cm.

A Tabela 6 mostra os valores para as propriedades mecânicas dos concretos auto-adensáveis utilizados.

A Tabela 7 mostra os resultados para a força de ruptura ( $P_u$ ) e sua correspondente flecha ( $\delta_u$ ) dos ensaios de viga de cada série.

A Figura 6 mostra a variação dos resultados dos ensaios de viga para cada série.

A Figura 7 mostra a forma de ruptura do ensaio do modelo de viga.

Nos ensaios de viga, para todas as séries o modo de ruptura ocorreu por escoamento da barra de aço em seu ponto central, com o esmagamento do concreto existente entre a placa da rótula e a barra de aço (Figura 7).

#### 4. Análise e discussão dos resultados

Com relação à variabilidade do CAA no estado endurecido, se pode dizer que, nos ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, muitos fatores tiveram possível influência na sua variabilidade, como por exemplo, o capeamento e o índice de ar incorporado aos corpos-de-prova (CP).

Os ensaios de resistência à tração foram caracterizados pelo fendilhamento do concreto, ou seja, tiveram uma ruptura brusca. Esse tipo de ruptura pode comprometer a média dos resultados, conduzindo a uma grande margem de variação, conforme visto nos ensaios.

A Figura 8 mostra a variação do módulo de elasticidade com relação à densidade, resistência à compressão e à tração de cada corpo-de-prova (CP) ensaiado. De acordo com os resultados, nos concretos mais fluidos houve variação um pouco superior ao concreto menos fluido (CAA2). Essa variabilidade foi um pouco menor quando se descartaram CP's depois da análise estatística em papel probabilístico. Uma explicação, como comentado anteriormente, para essa variabilidade pode ser o capeamento (possibilidade mais preponderante), presença de vazios na face do CP (possibilidade provável) ou má utilização do equipamento (possibilidade menos provável).

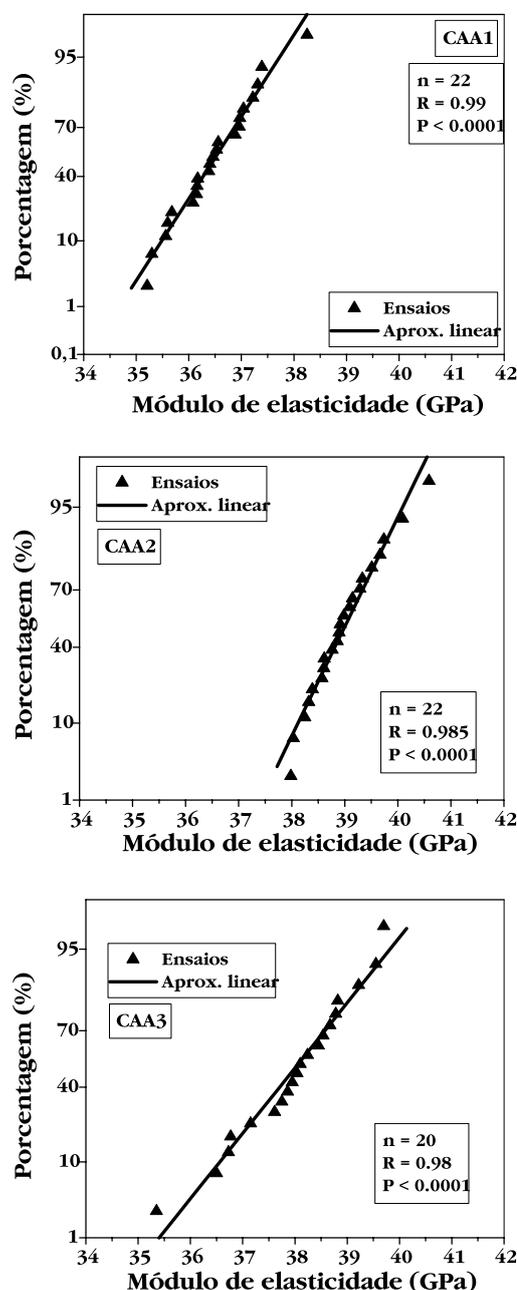
De acordo com a Figura 8, à medida que se aumenta a densidade do CP, se aumenta o valor do módulo de elasticidade e, constatou-se que quando se aumenta o valor da resistência à compressão,

se aumenta o valor do módulo de elasticidade, com uma pequena variabilidade.

Constatou-se que, por maior que seja a resistência à tração, isso não significa aumento do módulo de elasticidade, o que reforça a conclusão anterior sobre a influência do modo de ruptura do CP na resistência à tração, juntamente com sua dispersão de resultados para cada série.

O ensaio de compressão indireta ou “brasileiro” apresenta uma

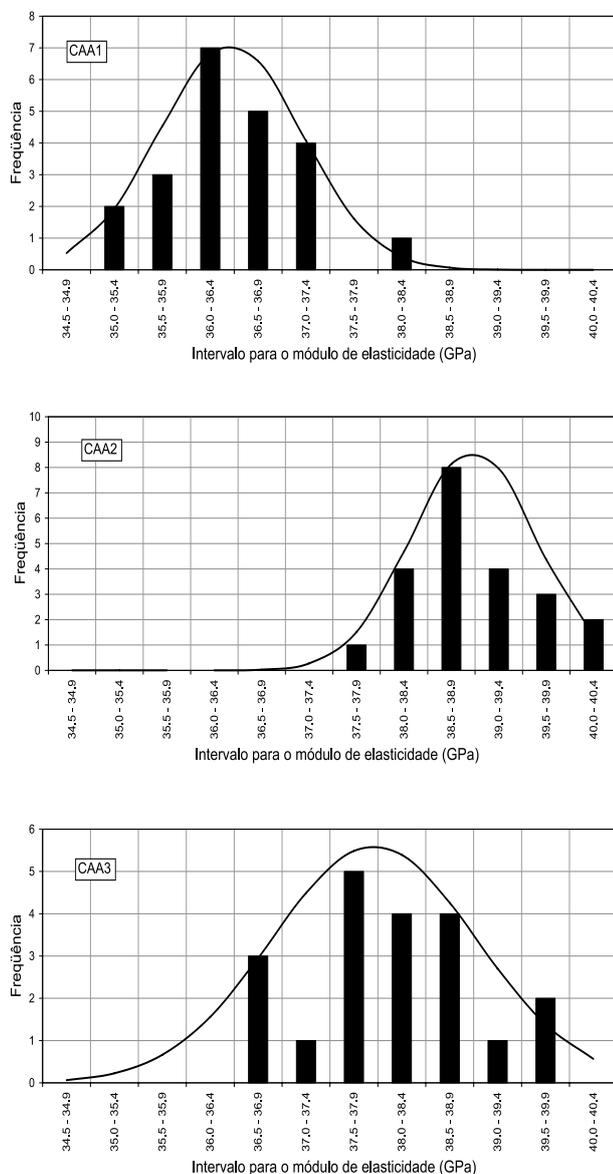
**Figura 9 – Representação do módulo de elasticidade em papel probabilístico**



alta variabilidade por causa de seu modo de ruptura, o qual depende do apoio do CP no aparato.

Com relação à variabilidade da Figura 8, essa variação para os concretos menos fluidos, em relação aos concretos mais fluidos, pode ser conseqüência da velocidade de preenchimento das fôrmas dos CP's, pois, quanto maior a velocidade de lançamento do CAA, maior a possibilidade que o ar presente na fôrma não tenha tempo suficiente para escapar, provocando assim a formação de bolhas de ar incorporado no concreto, mas ainda são necessários mais ensaios para verificar o grau de influência para se ter uma avaliação mais confiável.

**Figura 10 – Distribuição normal e freqüência do módulo de elasticidade de cada série**



Com relação ao estudo estatístico dessa investigação experimental, a análise dos resultados no estado endurecido foi realizada com a utilização da média, desvio padrão e coeficiente de variação de cada série.

A Tabela 8 mostra o intervalo de confiança para o módulo de elasticidade das séries CAA1, CAA2 e CAA3.

De acordo com a Tabela 8, o intervalo de confiança de 95% foi estabelecido para a média dos valores do módulo de elasticidade com um número de amostras acima de 19, e mostrou que nenhum dos valores obtidos experimentalmente ficou fora deste intervalo, demonstrando assim que a variação do resultado foi pequena.

A Figura 9 mostra a representação dos dados obtidos em papel probabilístico normal.

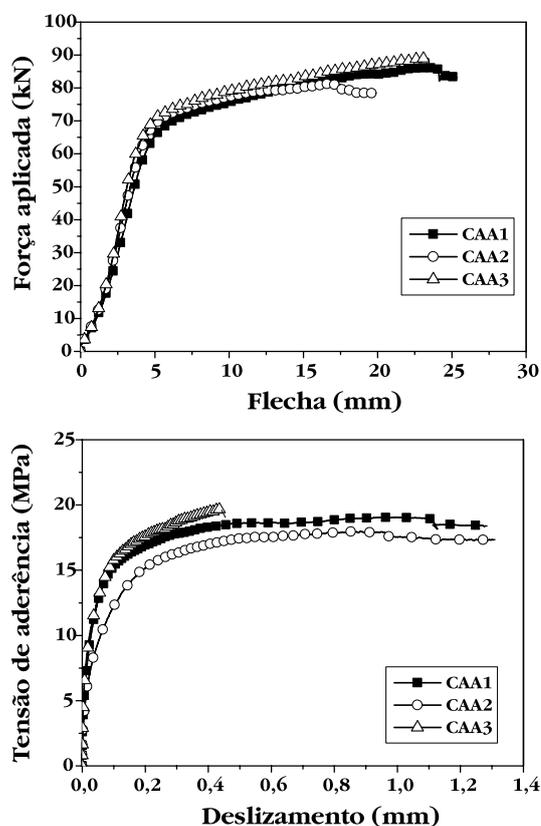
De acordo com a Figura 9, comprovou-se que os resultados seguem uma distribuição normal probabilística.

A Figura 10 ilustra o comportamento da freqüência e distribuição normal do módulo de elasticidade de cada série.

Com relação aos ensaios de viga, a variabilidade do ensaio foi inferior a 10%, garantindo que o ensaio era adequado para analisar a resistência de aderência. A Figura 11 mostra a média dos resultados experimentais dos ensaios de viga e mostra o comportamento da resistência de aderência vs. deslizamento para as três séries.

De acordo com a Figura 11, pode-se ver que a variabilidade do com-

**Figura 11 – Comparação das três séries no diagrama força aplicada vs. flecha e tensão de aderência vs. deslizamento**



portamento do ensaio foi pequena. Ainda, os deslizamentos obtidos foram pequenos, caracterizando que houve deformações excessivas na barra de aço, conforme a Figura 7. Esse deslizamento foi semelhante para todos os ensaios, porém apresentou valores menores do que os estabelecidos pelo Rilem-Ceb-Fip [8], que limita o deslizamento da barra de aço em relação ao prisma de concreto em 3,0 mm.

A Figura 12 mostra a variação da força aplicada, a correspondente flecha de cada ensaio de viga e a variabilidade da resistência última de aderência com relação ao seu respectivo deslizamento para as três séries de vigas.

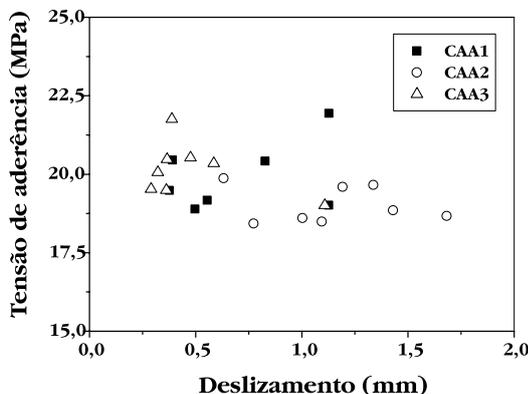
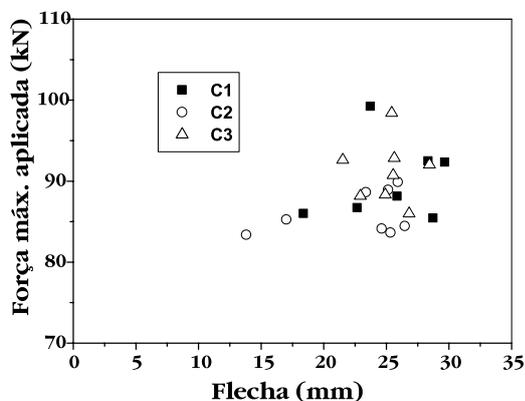
De acordo com a Figura 12, à medida que se aumenta o deslizamento da barra, ocorre a redução do valor da resistência de aderência. Isso pode ser explicado pelo fato de, quando se mediam os resultados da força máxima aplicada ao ensaio, há possibilidade da interferência do conjunto referente à reação da barra de aço na placa da rótula e plastificação no ponto central da barra de aço. Outro fator que promoveu para essa variação foi o valor do módulo de elasticidade das séries, onde a série CAA2 foi a que apresentou maior deslizamento.

Para se avaliar estatisticamente os resultados dos ensaios de viga, uma distribuição normal e uma análise de frequência não seria adequada devido à pequena quantidade de amostras (oito para cada série). Mesmo assim, com um coeficiente de variação inferior a 10%, optou por realizar uma análise em papel probabilístico nor-

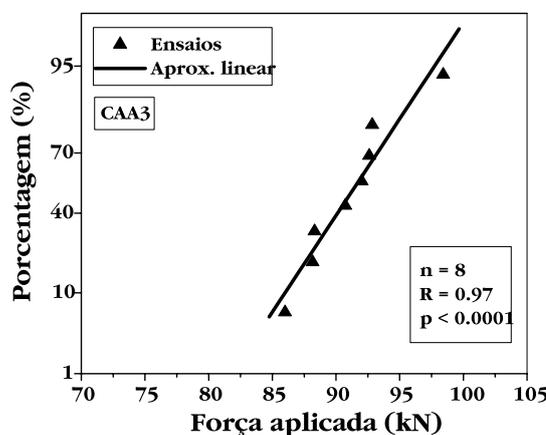
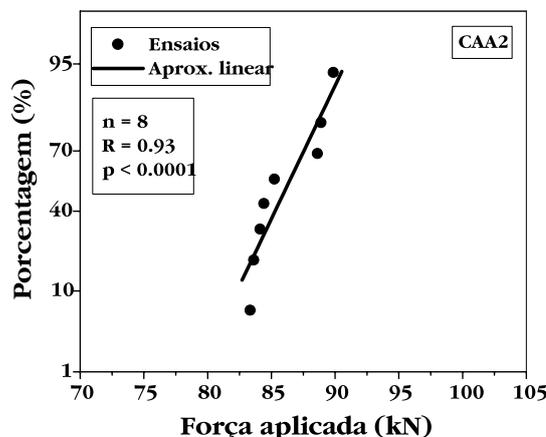
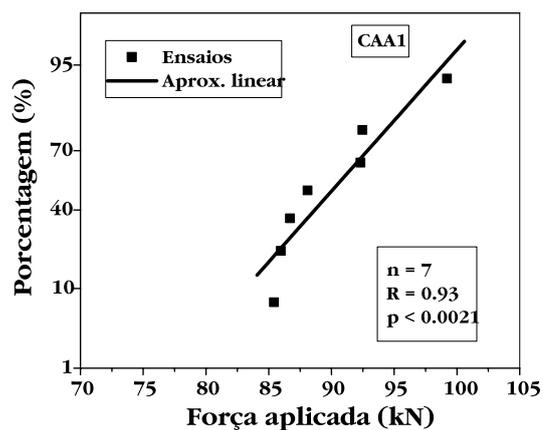
mal para avaliar se os resultados são representativos e podem ser representados em uma distribuição normal. A Figura 13 mostra os resultados referentes à força máxima aplicada nos ensaios de viga ordenados em papel probabilístico normal.

A Figura 14 ilustra o comportamento da frequência e distribuição

**Figura 12 - Variação dos resultados experimentais para as séries de vigas**



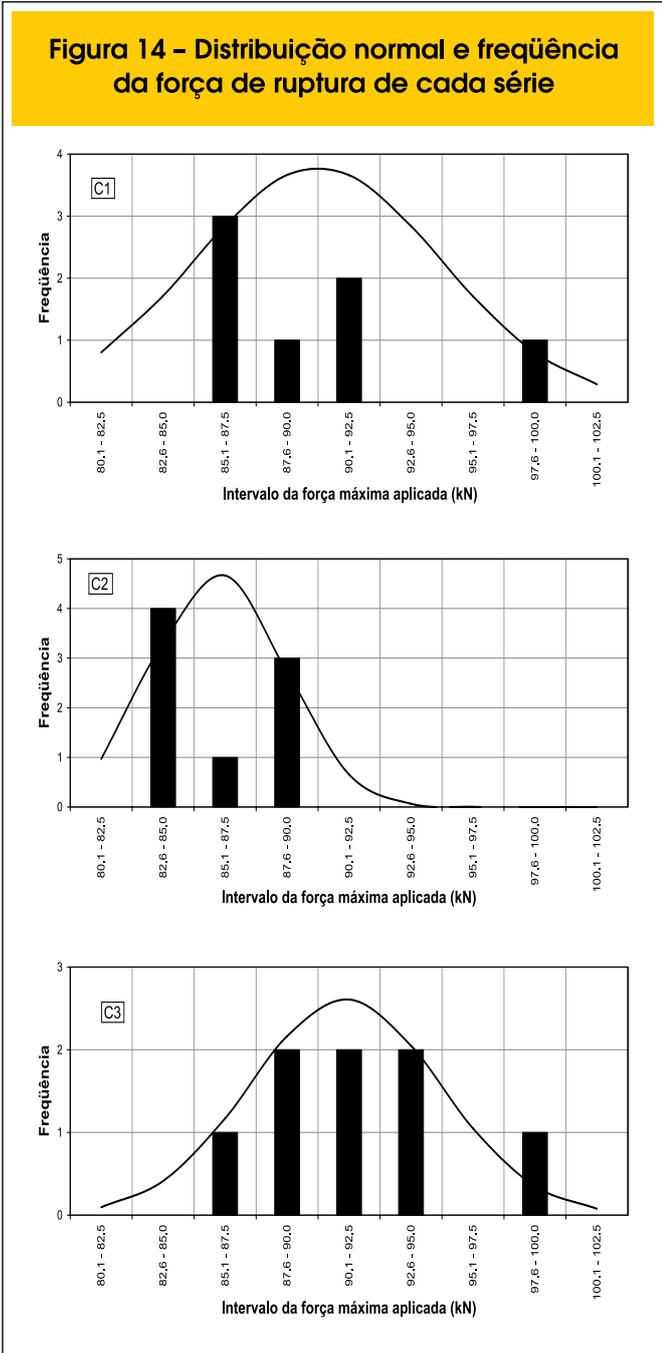
**Figura 13 - Representação da força de ruptura em papel probabilístico**



normal da força de ruptura de cada série de viga. A Tabela 9 mostra o intervalo de confiança para força de ruptura do ensaio de viga das séries CAA1, CAA2 e CAA3. De acordo com a Tabela 9, o intervalo de confiança de 95% foi estabelecido para a média dos valores da força de ruptura do ensaio de viga com um número de amostras acima de 7, e mostrou que nenhum dos valores obtidos experimentalmente ficou fora deste intervalo, demonstrando que a variação do resultado foi pequena. Com isso, os resultados dos ensaios de viga possuem representatividade e apresentam pequena variabilidade.

**Tabela 9 - Intervalo de confiança (IC) para o força de ruptura do ensaio de viga (em kN)**

	CAA1	CAA2	CAA3
M (kN)	90.04	86.03	91.14
D.P. (kN)	4.97	2.66	3.82
Graus de liberdade	6	7	7
Limite inferior (kN)	77.89	79.74	82.10
Limite superior (kN)	102.20	92.31	100.18



### 5. Conclusão

O objetivo desta investigação experimental foi analisar, estatisticamente, a variabilidade das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável, notadamente: resistência à compressão e à tração do concreto, módulo de elasticidade em corpos-de-prova de 15x 30 cm e resistência de aderência em vigas adaptadas para o ensaio padronizado do Rilem-Ceb-Fip [8]. Todos os ensaios foram realizados aos 28 dias no *Laboratório de Tecnología de Estructuras* do *Departamento de Ingeniería de la Construcción* em Barcelona (Espanha).

Vale comentar que os resultados obtidos são válidos para as condições de laboratório e materiais utilizados nesta pesquisa. Com relação ao estudo da variabilidade no estado endurecido, este foi dividido em duas partes, sendo a primeira referente às propriedades mecânicas no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) aos 28 dias, ensaiados conforme a metodologia comentada; e a segunda parte, que consistiu do estudo da variabilidade da resistência de aderência dos mesmos CAA's estudados na primeira parte aos 28 dias.

De acordo com os resultados observados na primeira parte dessa pesquisa, foi verificado que:

- Nos ensaios de resistência à compressão, muitos fatores tiveram influência em sua variabilidade, principalmente o capeamento e o ar incorporado nos corpos-de-prova;
- Para os ensaios à tração, a variabilidade foi conseqüência da forma de ruptura do CP;
- Com um intervalo de confiança de 95%, os concretos auto-adensáveis as três séries mostraram comportamento semelhante ao concreto convencional (que utiliza o mesmo IC de 95%) e que a variabilidade foi inferior que 10% e, somente no caso da resistência à tração que houve resultados acima de 10%, mostrando ser necessário um estudo sobre o ensaio de resistência à compressão indireta (ou "brasileiro").

Com relação aos ensaios de resistência de aderência, se pode concluir que:

- A resistência de aderência não foi prejudicada pela falta de fluidez do CAA. De acordo com o que foi observado nos ensaios de viga, o aspecto das vigas concretadas com o CAA de pouca fluidez foi caracterizado pela presença de nichos sem concreto e alto índice de porosidade na superfície da viga, o que caracteriza uma fragilidade para a penetração de agentes nocivos à barra de aço (como ions de cloro, por exemplo);

**Figura 15 – Modelo de viga com menor fluidez (à direita) e modelo de viga com melhor fluidez (à esquerda)**



- A resistência de aderência aumenta de acordo com o aumento do módulo de elasticidade. Dessa maneira, os concretos de alto desempenho (alta resistência à compressão, presença de fibras, baixa porosidade e etc.) são ideais para garantir uma boa resistência de aderência e, conseqüentemente, garantir a segurança do elemento estrutural;
- Em contrapartida, os concretos de alto desempenho (nesse caso de alta resistência à compressão) têm como característica a ruptura frágil, independente do tipo de concreto utilizado. Nestes casos, ocorrerá o fendilhamento do material adjacente à barra, em função da resistência à tração do concreto utilizado. E a menos que haja uma armadura de confinamento prevista, de modo a aumentar a capacidade resistente do concreto, o escoamento da barra ou seu deslizamento não irão ocorrer;
- O tamanho do agregado graúdo (dependendo de sua origem) tem forte influência no valor da resistência de aderência, pois este aumenta o valor do módulo de elasticidade do CAA;
- O comportamento dos ensaios de viga para as três séries de CAA foi similar, mesmo com a pequena fluidez da série C1.

A Figura 15 mostra o modelo de viga em CAA que apresentou menor fluidez que os demais modelos de viga e o modelo que apresentou melhor fluidez.

Embora o acabamento do modelo de viga com menor fluidez tenha apresentado um aspecto ruim, este apresentou comportamento semelhante ao modelo com melhor acabamento.

Com relação ao ensaio, a limitação estabelecida pelo Rilem-Ceb-Fip [8] para um deslizamento máximo de 3,0 mm e o intervalo de resistência à compressão entre 22,5 e 27,5 MPa, mostram que este ensaio possui uma limitação crítica, pois quando se utilizam concretos de alta resistência à compressão, os deslizamentos são reduzidos por causa da forte influência do confinamento promovido pela resistência à compressão do concreto combinado com a armadura existente. Assim, como foi visto em todos os ensaios, ocorria plastificação da barra de aço em seu ponto central e a concentração de esforços na zona entre a barra de aço e a placa da rótula.

A interface aço-concreto foi extremamente rígida, uma vez que a resistência à compressão do concreto era de 50 MPa. Isso causou a plastificação da barra de aço em seu ponto central com pouco deslizamento na zona aderente. Essa informação é sujeita a con-

testação, pois o ensaio de viga utilizado apresenta peculiaridade que pode “mascarar” os resultados analisados. A Figura 16 mostra uma exemplificação dos passos do ensaio de viga e, utilizando uma analogia rudimentar do modelo de bielas e tirantes, pode-se observar que a trajetória da reação da força aplicada passa pela zona aderente.

Assim, como conclusões finais desta investigação experimental, pode-se afirmar que os concretos auto-adensáveis possuem alta qualidade e são bastante confiáveis (de acordo com a Tabela 1), por causa de sua pequena variabilidade, sendo assim uma ferramenta adequada e apta para utilização na construção civil.

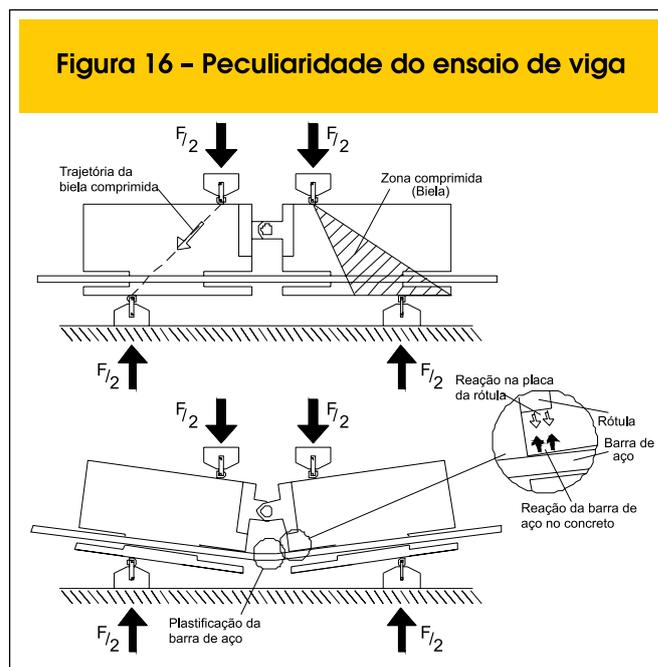
## 6. Agradecimentos

O grupo de pesquisa gostaria de agradecer ao Laboratório de Tecnologia de Estruturas e aos técnicos, Miguel Ángel e Camilo Bernard, por sua qualidade técnica e profissional. O grupo também expressa profundo agradecimento às empresas Promsa e Degussa pela doação de material para essa pesquisa experimental. Ainda, o primeiro autor expressa seu profundo agradecimento ao suporte financeiro garantido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos fornecida para o estágio de doutorado no exterior e, também agradecer aos investigadores Bryan E. Barragán, Joan Ramon Casas, Tomàs Garcia Vicente e José Ortiz por sua colaboração.

## 7. Referências bibliográficas

- [01] Okamura, H, Ouchi, M. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, V. 1, No. 1, Abril, 2003, p. 5-15.
- [02] Bui, VK, Akkaya, Y, Shah, SP. Rheological model for self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, V. 99, No. 6, November-december, 2002, p. 549-559.

**Figura 16 – Peculiaridade do ensaio de viga**



- [03] Gomes, PCC. Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, 140 p., 2002, Barcelona, Espanha.
- [04] Okamura, H. Self-compacting high-performance concrete. *Concrete International*, V. 19, No. 7, July, 1997, p. 50-54.
- [05] Calmon, JL, Tristão, FA, Giacometti, M, Meneguelli, M, Moratti, M. Estudo de finos e pastas para produção de concreto auto-adensável de alta resistência com filler de escória de aciaria e outras adições. In: 49º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC2007), Bento Gonçalves-RS, Anais..., 1 – 5 de setembro, 2007.
- [06] Araújo, J, Geyer, A, Castro, A, Andrade, M. Influência das adições nas propriedades mecânicas do concreto auto-adensável. In: 49º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC2007), Bento Gonçalves-RS, Anais..., 1 – 5 de setembro, 2007.
- [07] Barbosa, LAG, Lavandoscki, FI. Novas tecnologias e o concreto auto-adensável. In: 49º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC2007), Bento Gonçalves-RS, Anais..., 1 – 5 de setembro, 2007.
- [08] Rilem-Fip-Ceb. Bond test for reinforcing steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2-Pullout test (7-II-128): Tentative recommendations. *RILEM Journal Materials and Structures*, V. 6, No. 32, Março-abril, 1973, p. 96-105.
- [09] Song, PS, Wu, JC, Hwang, S, Sheu, BC. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, V. 35, p. 393-399, 2005.
- [10] Song, PS, Wu, JC, Hwang, S, Sheu, BC. Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, V. 19, p. 1-9, 2005.
- [11] Kacmaz, S, Samaranayake, VA, Nanni, A. Tensile characterization of glass FRP bars. *Composites: Part B*, V. 36, p. 127-134, 2005.
- [12] Bayramov, F, Tasdemir, C, Tasdemir, MA. Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. *Cement and Concrete Composites*, V. 26, p. 665-675, 2004.
- [13] Chanvillard, G, Aïtcint, PC. Pull-out behaviour of corrugated steel fibers. *Advances in Cement Based Materials*, V. 4, p. 28-41, 1996.
- [14] Lin, YH, Tyan, YY, Chang, TP, Chang, CY. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, V. 34, p. 1373-1380, 2004.
- [15] Gesoglu, M, Güneşli, E, Özturan, T. Effects of end conditions on compressive strength and static elastic modulus of very high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, V. 32, p. 1545-1550, 2002.
- [16] Freidin, C. Influence of variability of oil shale fly ash on compressive strength of cementless building compounds. *Construction and Building Materials*, V. 19, p. 127-133, 2005.
- [17] Hueste, MBD, Chomprea, P, Trejo, D, Cline, DBH, Keating, PB. Mechanical properties of high-strength concrete for prestressed members. *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 4, July-August, pp. 457-465, 2004.
- [18] Melchers, RE. *Structural Reliability: analysis and prediction*, Ellis Horwood Limited, ISBN: 0-85312-930-4, 1987.
- [19] Almeida Filho, FM. Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 291p, 2006.
- [20] Efnarc. Specification and guidelines for self-compacting concrete. 32 p., february, 2002, ISBN: 0-9539733-4-4.
- [21] Dehn, F, Holshemacher, K, Weiße, D. Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behavior. In: *LACER*, No. 5, 2000, 10 p.
- [22] Holshemacher, K, Dehn, F, Weiße, D. Bond in high-strength concrete – influence of rebar position. In: 6th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH / HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, Leipzig, Alemanha, junho de 2002, Proceedings..., Editores: Gert König; Frank Dehn; Thosten Faust, König, Heunisch und partner, consulting engineers, publicado por Leipzig University: Institute for structural concrete and building materials, ISBN: 3-934178-18-9, Leipzig: Leipzig University, 2002, p.289-298.
- [23] Domone, PL. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composites* V. 29, p. 1-12, 2007.
- [24] Chan, YW, Chen, YS, Liu, YS. Development of bond strength of reinforcement steel in self-consolidating concrete. *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 4, p. 490-498, 2003.
- [25] Alcântara, MAM, Lorrain, MS, Barbosa, MP. Avaliação da posição da armadura no desenvolvimento das tensões de aderência na interface entre o concreto auto-adensável e a armadura. Volume V – Pré-fabricados em concreto. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Florianópolis, Brasil, 14-18 de agosto de 2004, Anais..., Editores: Ivo J. Padaratz & Túlio N. Bittencourt, ISBN: 85-98576-02-6, Florianópolis, Trabalho CBC0165, p. V.76-V.90.
- [26] Isa, MM, Aguado, A. Comportamento da aderência entre o concreto auto-adensável de alta resistência e a armadura. IN: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Anais..., PEC/PCC – EPUSP, 7 a 10 de junho de 2003, São Paulo, SP, Brasil, ISBN: 85-86686-18-2, 8 p., [CD-ROM].

- [27] König, G, Holshemacher, K, Dehn, F, Weisse, D. Self-compacting concrete-time development of material properties and bond behavior. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, Tokio-Japan, Proceedings..., V. 1, 2001, p. 507-516.
- [28] Almeida Filho, FM, El Debs, ALHC. Arrancamento de barras de aço em modelos de arrancamento utilizando concretos auto-adensáveis e concretos convencionais de alta resistência. Revista IBRACON de Estruturas, V. 2, No. 1, p. 44-55, 2006.
- [29] Almeida Filho, FM, De Nardin S, El Debs ALHC. Evaluation of the bond strength of self-compacting concrete in pull-out tests. In: SECOND NORTH AMERICAN CONFERENCE ON THE DESIGN AND USE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE AND FOURTH INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, Chicago, Proceedings..., October 30-November 2, 2005.
- [30] Almeida Filho, FM, El Debs, ALHC. Experimental behavior of pull-out tests with high-strength self-compacting concrete with high cohesion. In: VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, Anais..., PEC/PCC – EPUSP, São Paulo-SP, 2006.
- [31] EHE. Instrucción de Hormigón Estructural. Real Decreto 2661/1998 del 11 de diciembre, Madrid, 1999.