

Propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos no Brasil

Renan S. Campos ⁽¹⁾, Mônica P. Barbosa ⁽²⁾ e Geraldo de F. Maciel ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Engenharia Mecânica, FEIS - UNESP, Ilha Solteira/SP, Brasil.

⁽²⁾ Departamento de Engenharia Civil, FEIS - UNESP, Ilha Solteira/SP, Brasil.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5622>

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) tem atraído a atenção de diversos pesquisadores desde seu advento, no final da década de 1980, no Japão. Em todo o mundo, diversos institutos de pesquisas, universidades e empresas procuraram desenvolver métodos de dosagem e metodologias de ensaio para a correta produção e avaliação das propriedades, em especial no estado fresco, desse novo concreto. O objetivo desse estudo foi compilar e analisar dados relativos à dosagem, desempenho no estado fresco e propriedades mecânicas de concretos autoadensáveis produzidos no Brasil. Para tanto, construiu-se uma base de dados que compreendeu resultados apresentados em teses, dissertações e artigos científicos publicados desde 2004. Neste trabalho é apresentada uma análise estatística inicial sobre os consumos de materiais, parâmetros de dosagem e propriedades nos estados fresco e endurecido de 555 composições de concreto autoadensável analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: concreto autoadensável, base de dados, materiais constituintes, estado fresco, propriedades mecânicas.

1.- INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável (CAA) é entendido como o concreto que possui a capacidade de fluir no interior da forma, por ação exclusiva de seu próprio peso, sem a necessidade de qualquer adensamento mecânico, e que possui a habilidade de passar por obstáculos sem apresentar bloqueio das partículas de agregado [1, 2].

Desde o advento do CAA, na década de 1980, no Japão, diversos métodos de dosagem e metodologias de caracterização no estado fresco foram propostas, com a finalidade de produzir e avaliar corretamente as propriedades desse material [1]. A dosagem do CAA demanda uma criteriosa seleção e combinação dos materiais constituintes, de modo a propiciar a racionalização de recursos, a obtenção das propriedades de autoadensabilidade requeridas, adequada resistência mecânica e o melhor custo-benefício. No que tange ao desempenho do estado fresco, desde 2010 está em vigor a NBR 15823 – partes 1 a 6 [2-7], que prescrevem os métodos de ensaio e de classificação do CAA no Brasil.

Tendo em vista os resultados experimentais relatados na literatura consultada, foi construída uma base de dados com o propósito de compilar e analisar dados relativos à dosagem, desempenho no estado fresco e propriedades mecânicas de concretos autoadensáveis produzidos no Brasil. Nesse estudo são apresentados os resultados das análises estatísticas iniciais, obtidas a partir da base de dados desenvolvida.

2.- METODOLOGIA

Para a formação da base de dados foram consultadas teses, dissertações e artigos científicos publicados desde 2004⁽¹⁾. Nesse levantamento não foram consideradas composições de CAA que empregaram fibras, agregados reciclados ou leves e cimentos não normalizados no Brasil. Foram coletados dados referentes à dosagem das composições (consumos de cimento, adição mineral, agregados, aditivos, água), aos materiais constituintes (tipos de cimento, adição, aditivo e agregados), desempenho dos concretos no estado fresco (espalhamento, tempos de escoamento t_{500} e no funil V, habilidade passante, resistência à segregação, massa específica) e também propriedades no estado endurecido (resistência à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade). As análises estatísticas apresentadas foram efetuadas com auxílio do *software* Minitab 17.

3.- RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1.- Parâmetros de dosagem

No Quadro 1 estão sintetizados os consumos de materiais comumente empregados na confecção de CAA no Brasil.

Quadro 1. Consumos de materiais empregados na produção dos CAA's analisados.

| Material | n° de dados | Consumo [kg/m ³] | | | | |
|------------------------------|-------------|------------------------------|------------|---------|------------|--------|
| | | Mínimo | 1° quartil | Mediana | 3° quartil | Máximo |
| Cimento | 555 | 113,0 | 331,4 | 390,0 | 467,0 | 740,0 |
| Filer calcário | 163 | 9,0 | 126,0 | 183,0 | 296,0 | 539,0 |
| Metacaulim | 76 | 18,9 | 30,6 | 51,3 | 85,5 | 194,0 |
| Sílica ativa | 72 | 12,5 | 25,3 | 33,5 | 42,7 | 90,0 |
| Cinza volante | 53 | 26,5 | 63,1 | 81,8 | 160,5 | 201,0 |
| Resíduo de mármore e granito | 33 | 26,3 | 196,0 | 200,0 | 207,8 | 263,9 |
| Cinza de casca de arroz | 27 | 18,0 | 67,8 | 113,0 | 128,5 | 245,0 |
| Agregado miúdo | 555 | 262,0 | 696,3 | 780,0 | 874,0 | 1257,2 |
| Agregado graúdo | 555 | 279,8 | 762,4 | 860,5 | 963,0 | 1190,0 |
| Aditivo superplastificante | 555 | 0,686 | 2,400 | 3,730 | 5,733 | 14,960 |
| Água | 555 | 120,0 | 191,0 | 208,0 | 224,3 | 293,5 |

Além das adições mencionadas no Quadro 1 (mais representativas), verificou-se que outros tipos de adição mineral foram empregadas para a produção de CAA, tais como: escória de alto forno e de aciaria, cal hidráulica, cinza de bagaço de cana, filers pétreos (quartzo, micaxisto, granito, filito) e resíduos de caulim. Das 555 composições de CAA analisadas, 102 foram produzidas unicamente com cimento como material fino, 411 empregaram um tipo de adição mineral e cimento, 38 misturas foram compostas por dois tipos de adição mineral e apenas 4 composições foram produzidas com três ou mais adições minerais.

Com relação aos aditivos químicos, todas as misturas estudadas utilizaram aditivo superplastificante para obtenção do CAA, em 49 composições também foi utilizado aditivo modificador de viscosidade e em 45 misturas houve o emprego concomitante de aditivo plastificante.

No tocante aos tipos de cimento empregados, é possível notar (ver Figura 1) que os cimentos de alta resistência inicial (CP V ARI) e de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V ARI RS) foram os mais comumente utilizados, fato que pode estar relacionado à aplicação do CAA em elementos de concreto pré-moldado, que exigem desforma mais rápida das peças. Em menor proporção, verificou-se a utilização dos cimentos compostos CP II F 32 e CP II Z 32 e do cimento CP IV 32. Dentre as composições analisadas, foi também relatado o uso dos cimentos CP I S 32, CP II E 32, CP III 40 RS e CP B.

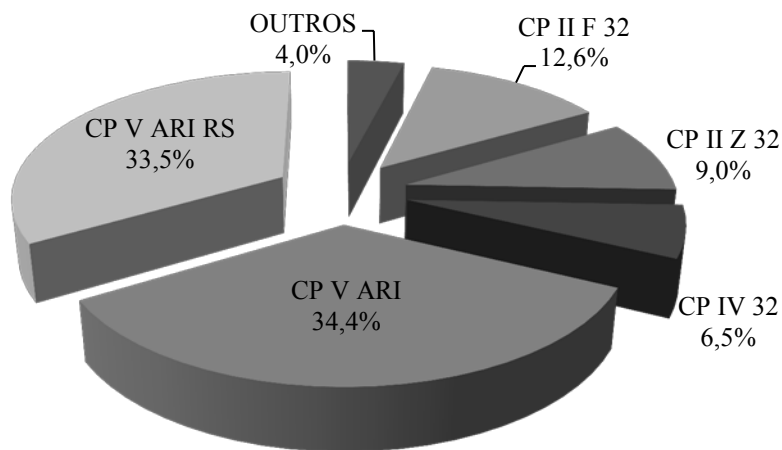


Figura 1. Tipos de cimento empregados nas composições de CAA analisadas.

Outros parâmetros importantes que dizem respeito à dosagem do CAA são as relações água/cimento (a/c), água/aglomerante (a/ag) e água/finos (a/f). Os volumes de pasta e de argamassa também são informações úteis no proporcionamento do CAA. Tais resultados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Parâmetros de dosagem das composições de CAA analisadas.

| <i>Relações</i> | <i>n° de dados</i> | <i>Mínimo</i> | <i>1° quartil</i> | <i>Mediana</i> | <i>3° quartil</i> | <i>Máximo</i> |
|---------------------------------------|--------------------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|---------------|
| a/c [em massa] | 555 | 0,2351 | 0,4499 | 0,5200 | 0,6441 | 2,3800 |
| a/ag [em massa] | 555 | 0,2188 | 0,4200 | 0,5000 | 0,6000 | 1,1900 |
| a/f [em massa] | 555 | 0,2049 | 0,3275 | 0,4100 | 0,5001 | 1,1900 |
| Vol. de pasta [l/m ³] | 555 | 276,63 | 348,57 | 394,43 | 415,29 | 573,70 |
| Vol. de argamassa [l/m ³] | 555 | 556,51 | 649,18 | 684,43 | 713,85 | 899,38 |

Ao analisar os dados constantes nos Quadros 1 e 2 verifica-se que os consumos de material e os parâmetros de dosagem apresentaram grande variação, o que pode ser atribuído à expressiva gama de composições analisadas. Tais resultados vão ao encontro daqueles obtidos por [8,9].

3.2.- Propriedades no estado fresco

O desempenho dos concretos no estado fresco é apresentado no Quadro 3.

Quadro 3. Propriedades no estado fresco das composições de CAA analisadas.

| <i>Propriedade</i> | <i>n° de dados</i> | <i>Mínimo</i> | <i>1° quartil</i> | <i>Mediana</i> | <i>3° quartil</i> | <i>Máximo</i> |
|---------------------------------------|--------------------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|---------------|
| Espalhamento [mm] | 543 | 500,0 | 623,0 | 670,0 | 715,0 | 895,0 |
| T ₅₀₀ [s] | 314 | 0,49 | 2,00 | 3,00 | 4,00 | 16,20 |
| Funil V [s] | 397 | 1,50 | 4,50 | 6,20 | 9,55 | 76,00 |
| Caixa L [-] | 358 | 0,31 | 0,81 | 0,87 | 0,94 | 1,00 |
| Resistência à segregação [%] | 112 | 0,00 | 3,43 | 6,95 | 9,43 | 36,70 |
| Massa específica [kg/m ³] | 200 | 2185 | 2314 | 2355 | 2391 | 2490 |

Ao analisar os dados constantes no Quadro 3 é possível notar que o ensaio mais amplamente empregado na caracterização do CAA no estado fresco é o espalhamento (realizado para 97,84% das composições analisadas). A viscosidade medida pelo método do funil V e a habilidade passante, avaliada por meio do ensaio da caixa L, também se mostraram ensaios comuns, realizados em 71,53% e 64,50% das misturas, respectivamente. Ainda com relação aos dados apresentados no Quadro 3, percebe-se que, em alguns casos, as composições de CAA analisadas não atingiram os valores mínimos estipulados pela NBR 15823-1:2010 [2] no que tange ao espalhamento e a habilidade passante, e também superaram os limites normativos com relação à resistência à segregação, ao tempo de escoamento no funil V e ao espalhamento. No entanto, cabe ressaltar que a maioria dos dados reportados nas composições analisadas atenderam aos limites normativos prescritos pela NBR 15823-1:2010 [2], como exemplifica o histograma com os dados do ensaio de espalhamento, apresentado na Figura 2, em que 97,97% dos resultados apresentados estão compreendidos no intervalo típico de 550-850 mm.

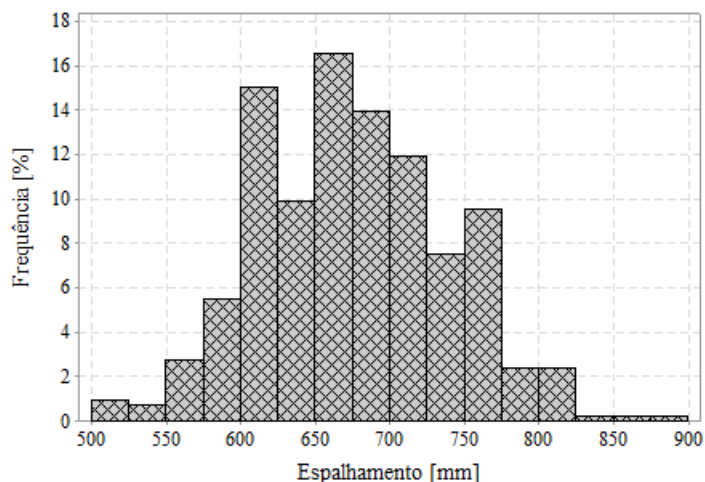


Figura 2. Histograma relativo ao ensaio de espalhamento.

Tentou-se verificar a existência de correlação entre os volumes de pasta e argamassa com o diâmetro de espalhamento obtido pelas composições analisadas, cujos resultados são apresentados na Figura 3.

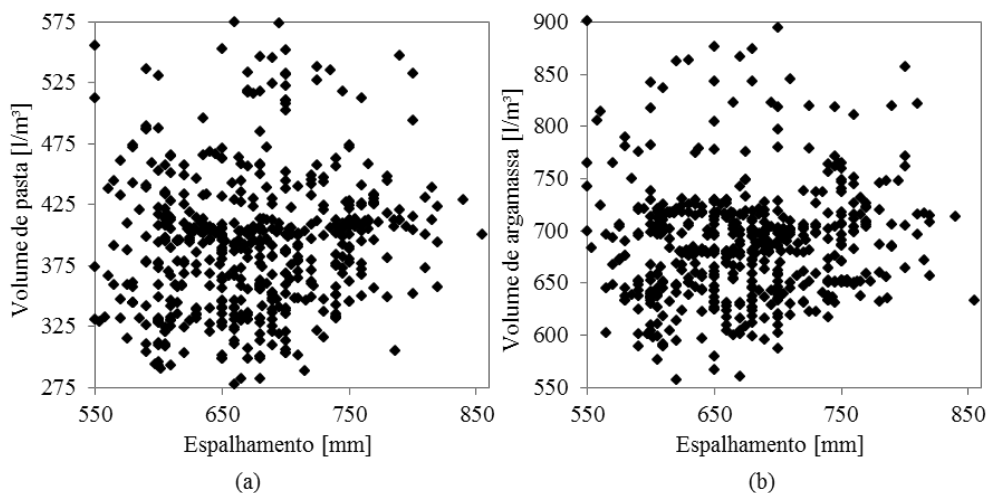


Figura 3. Correlações entre o espalhamento e os volumes de (a) pasta e (b) argamassa das misturas analisadas.

Não foi possível verificar qualquer correlação entre os volumes de pasta e argamassa e o diâmetro de espalhamento. Além da grande variação de consumos de materiais empregados na dosagem dos CAA analisados, é preciso levar em conta que o desempenho, no estado fresco, também está vinculado às interações entre os materiais constituintes, ao

Propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos no Brasil

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

procedimento e a energia de mistura empregados e às condições ambientais, como temperatura e umidade do ar, que podem, também, ser fatores intervenientes.

Tendo em vista que nem sempre todos os ensaios normativos previstos para a caracterização do CAA no estado fresco são executados, foi feita uma tentativa de correlacionar os resultados do ensaio espalhamento com as demais propriedades no estado fresco (tempos de escoamento t_{500} e no funil V, habilidade passante e resistência à segregação). Para tal análise, somente foram consideradas as composições de CAA que se enquadraram nos limites previstos pela NBR 15823-1:2010 [2], sendo os resultados obtidos apresentados na Figura 4.

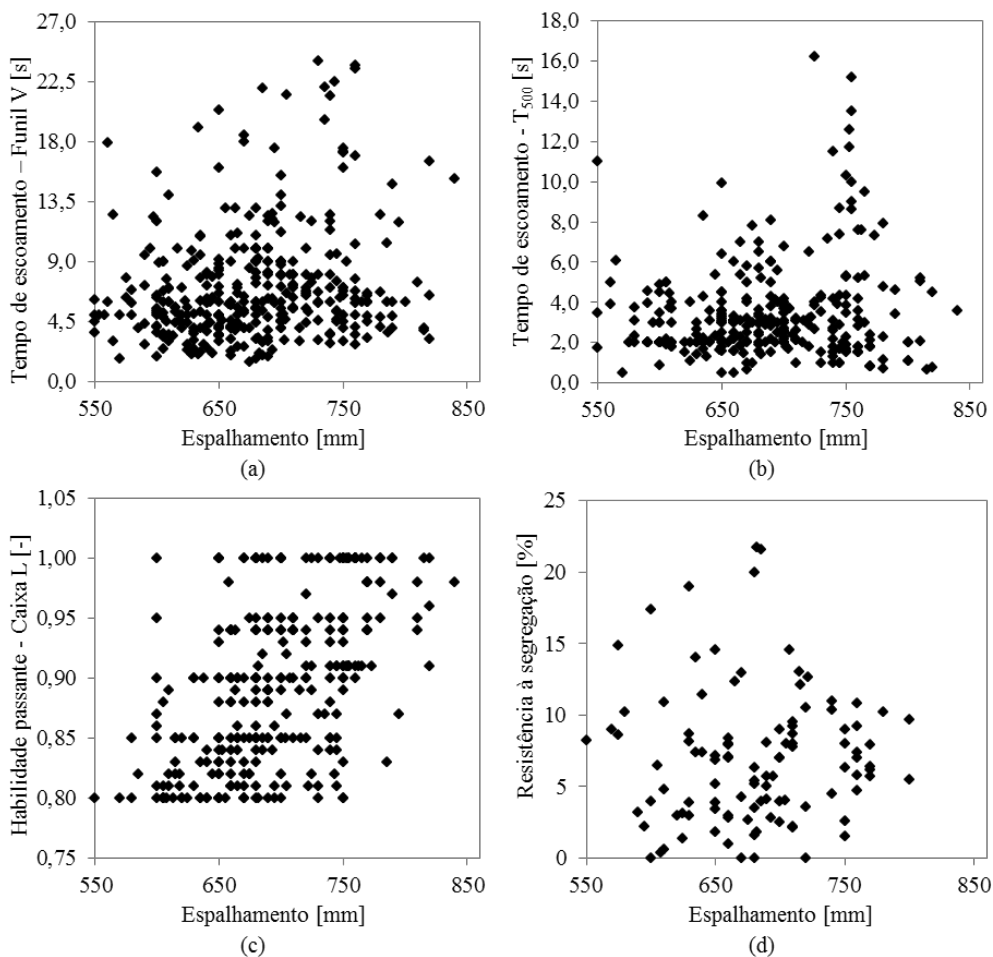


Figura 4. Correlações entre o ensaio de espalhamento e (a) tempo de escoamento no funil V, (b) tempo de escoamento t_{500} , (c) habilidade passante e (d) resistência à segregação.

Ao analisar os dados constantes na Figura 4 nota-se que não foram encontradas correlações significativas entre o diâmetro médio de espalhamento e as demais propriedades características do CAA no estado fresco. Tal fato pode estar relacionado com a ampla gama de composições analisadas, uma vez que não houve qualquer tipo de estratificação dos dados apresentados. Outro fator que deve ser considerado é que os ensaios de espalhamento, tempo de escoamento (t_{500} e no funil V), habilidade passante e resistência à segregação avaliam o comportamento reológico do concreto sob diferentes condições, o que também pode explicar inexistência de correlação entre tais propriedades. O estudo de [10] vai ao encontro dos resultados aqui apresentados.

3.3.- Propriedades no estado endurecido

As composições de CAA analisadas apresentaram resistência à compressão entre 10,3 e 89,7 MPa aos 28 dias. Na Figura 5 são apresentadas as correlações entre as relações água/cimento e água/aglomerante e a resistência à compressão axial aos 28 dias.

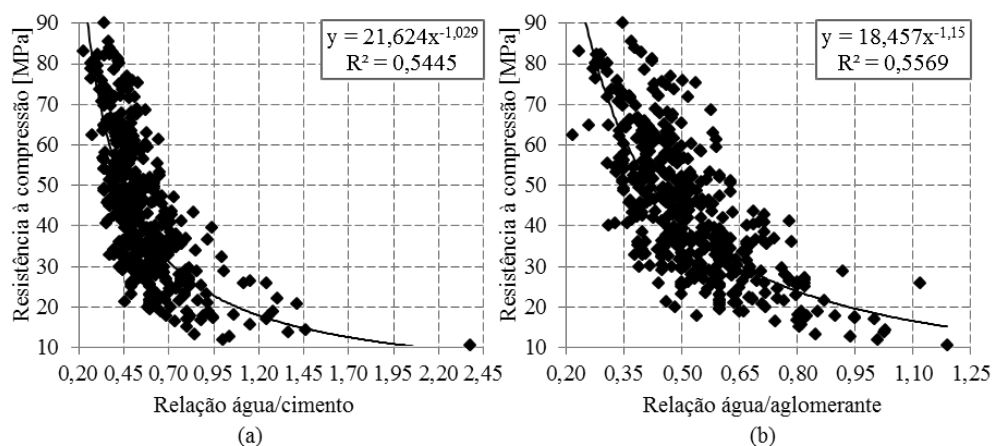


Figura 5. Correlações entre as relações (a) água/cimento e (b) água/aglomerante, e resistência à compressão.

Na Figura 6 são mostradas as correlações entre as resistências à compressão e à tração por compressão diametral e entre resistência à compressão e módulo de elasticidade estático, aos 28 dias, para ambos os casos.

Propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos no Brasil

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

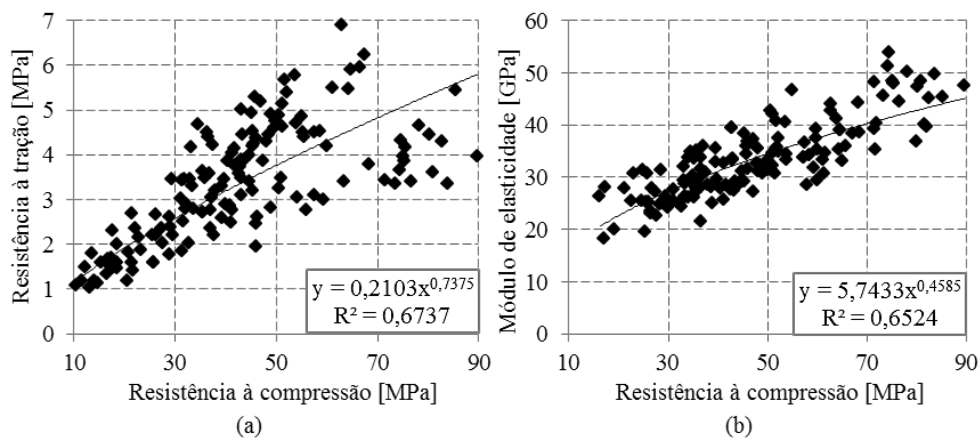


Figura 6. Correlações entre resistência à compressão e (a) resistência à tração e (b) módulo de elasticidade estático.

Apesar de terem sido obtidos coeficientes de determinação moderados (R^2 variando de 0,54-0,67), é importante ressaltar que nessa análise inicial, apresentada nas Figuras 5 e 6, não houve qualquer estratificação dos dados em função do tipo de cimento, origem petrográfica do agregado graúdo, tipo de adição mineral, entre outros fatores, o que pode justificar a dispersão dos mesmos.

Na Figura 7 são apresentadas as correlações entre o fator água/cimento e a resistência à compressão axial aos 28 dias para as composições de CAA produzidas com cimentos de alta resistência inicial (CP V ARI e CP V ARI RS) e com agregados graúdos basálticos e graníticos.

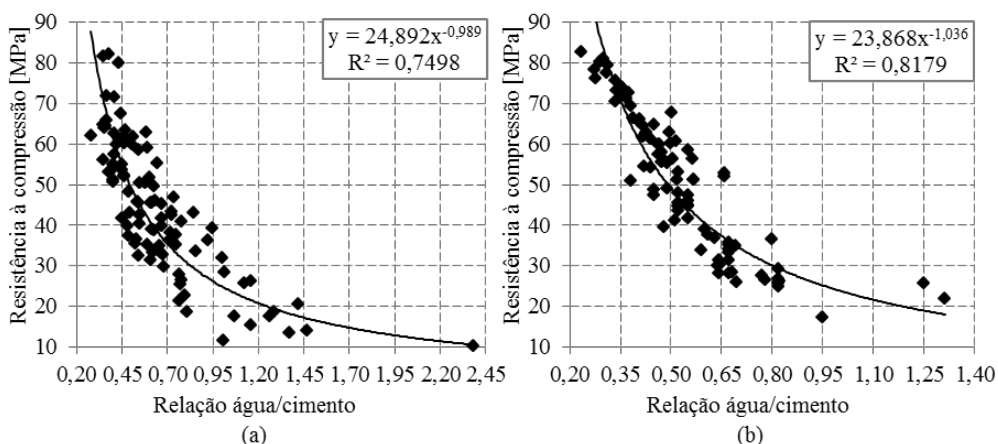


Figura 7. Correlações entre a relação água/cimento e resistência à compressão dos CAA's produzidos com cimentos de alta resistência inicial e com agregado graúdo (a) basáltico e (b) granítico.

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 7, nota-se que, com a estratificação dos dados, foi possível obter modelos com maior aderência (R^2 entre 0,75-0,82). Deste modo, as equações de comportamento obtidas por meio dos dados estratificados poderão servir como ponto de partida para a obtenção de concretos autoadensáveis com propriedades mecânicas fixadas em função da relação água/cimento, por exemplo.

4.- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentadas análises estatísticas iniciais sobre os materiais constituintes, parâmetros de dosagem e propriedades nos estados fresco e endurecido de 555 composições de concreto autoadensável produzidas no Brasil. Não foram encontradas correlações estatisticamente significativas entre os resultados do ensaio de espalhamento e as demais propriedades características do CAA no estado fresco. Os volumes de pasta e de argamassa também não apresentaram correlação com o diâmetro de espalhamento. No que tange às propriedades mecânicas, foram obtidas correlações moderadas entre as resistências à compressão e à tração e entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático. Por fim, ressalta-se que, de modo geral, foi verificada grande dispersão nos dados obtidos, o que pode ser atribuído ao amplo espectro de composições analisadas e também por conta da não estratificação dos dados em função dos tipos de cimento, adição mineral, origem petrográfica dos agregados, entre outros fatores. Assim, novas análises estão em desenvolvimento para que se obtenha melhor entendimento sobre a existência de possíveis relações entre os materiais constituintes e as propriedades nos estados fresco e endurecido do CAA.

REFERÊNCIAS

- [1] Okamura, H.; Ouchi, M., 'Self-compacting high performance concrete', Progress in Structural Engineering and Materials 1 (4) (1998) 378-383.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 'NBR 15823-1: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco', 2010, 11 p.
- [3] 'NBR 15823-2: Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams', 2010, 8 p.
- [4] 'NBR 15823-3: Concreto auto-adensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J', 2010, 8 p.
- [5] 'NBR 15823-4: Concreto auto-adensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L', 2010, 8 p.
- [6] 'NBR 15823-5: Concreto auto-adensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V', 2010, 7 p.
- [7] 'NBR 15823-6: Concreto auto-adensável - Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação', 2010, 7 p.

Propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos no Brasil

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [8] Desnerck, P. et al., ‘Mechanical Properties’, in ‘Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete’, Springer Science & Business Media, London, 2014 15-71.
- [9] Craeye, B. et al., ‘Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes’, *Cement & Concrete Composites* 54 (2014) 53–61.
- [10] Livi, C. N.; Repette, W. L., ‘Compilação e Análise Estatística de Resultados de Ensaíos em Concreto Auto-Adensável no Estado Fresco’, in *Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto*, Florianópolis/SC, Novembro, 2011.

(1) NOTA: em função da limitação de espaço, as referências aos trabalhos que compõem a base de dados não foram apresentadas. Aos interessados em saber quais são tais referências, é pedida a gentileza de entrar em contato com os autores.