

CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS E CONVENCIONAIS: ANÁLISE DAS PROPRIEDADES EM ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Self-consolidating and conventional concretes: evaluation of fresh and hardened states properties

Ana Claudia BERGMANN¹, Gustavo SAVARIS², Carlos Eduardo Tino BALESTRA³, Lucia BRESSIANI⁴

Recebido em 22 de janeiro de 2019; aceito em 02 de abril de 2019; disponível on-line em 12 de maio de 2020.



PALAVRAS CHAVE:

Concreto;
Autoadensável;
Propriedades mecânicas;
Cinza volante;
Módulo de elasticidade.

KEYWORDS:

Concrete;
Self-consolidating;
Mechanical properties;
Fly ash;
Modulus of elasticity.

RESUMO: Os concretos autoadensáveis destacam-se por suas características essenciais: capacidade de preenchimento de fôrmas, habilidade passante e resistência à segregação, permitindo assim o aumento da qualidade de peças estruturais de concreto, assim como a otimização de sua execução. Contudo, para obtenção de suas características essenciais, um fator é imprescindível trata da utilização de materiais finos, com o objetivo de controlar os efeitos negativos de segregação e exsudação à que o concreto fresco é suscetível a apresentar. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo comparar as propriedades no estado fresco e endurecido de um concreto autoadensável, utilizando cinza volante como material fino, com um concreto convencional, produzidos com materiais disponíveis na região de Toledo-PR. Os resultados demonstraram que o concreto autoadensável apresentou melhor desempenho quanto às propriedades mecânicas em relação ao concreto convencional. As imagens obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura corroboraram para sustentar as afirmativas acerca da melhora nas propriedades mecânicas do concreto autoadensável, uma vez que foi evidenciada uma menor quantidade de vazios graças à atividade pozzolânica da cinza volante. Neste sentido, este trabalho contribui para a difusão do concreto autoadensável e seu uso em construções usuais, resultando em estruturas de concreto duráveis e confiáveis, reduzindo a necessidade de manutenções.

ABSTRACT: *The self-consolidating concretes stand out for their essential characteristics: flowability, passing ability and segregation resistance, allowing the increase of the structural elements quality, as well as the optimization of their production. However, in order to obtain its essential characteristics, the main factor is the use of fines, in order to control the negative effects of segregation and bleeding to which fresh concrete is susceptible. In this context, the aim of this paper is to compare the properties, in the fresh and hardened states, of self-consolidating concretes, using fly ash as fine material with the properties of a conventional concrete, produced with materials available in the Toledo-PR, Brazil. The results showed that the self-consolidating concrete presented better performance in relation to the mechanical properties compared to conventional concrete. Using scanning electronic microscopy the affirmations about the improvement in the mechanical properties of self-consolidating concrete were proven, since a smaller amount of voids was evidenced due to the pozzolanic activity of fly ash. In this sense, this work contributes to the diffusion of self-consolidating concrete in the literature and its use in usual constructions, resulting in durable and reliable concrete structures, reducing the maintenance works.*

* Contato com os autores:

¹ e-mail: anacbergmann@gmail.com (A. C. Bergmann)

Engenheira Civil, Mestranda em Economia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

² e-mail: gsavaris@utfpr.edu.br (G. Savaris)

Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Toledo.

³ e-mail: carlosbalestra@utfpr.edu.br (C. E. T. Balestra)

Engenheiro Civil, Doutor em Infraestrutura Aeronáutica, Professor Adjunto, Univ. Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Toledo.

⁴ e-mail: bressiani@utfpr.edu.br (L. Bressiani)

Engenheira Civil, Doutora em Engenharia Civil, Professora Adjunta, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Toledo.

1. INTRODUÇÃO

A partir de seu desenvolvimento no Japão, na década de 80, o concreto autoadensável (CAA) possibilitou a solução de um dos problemas enfrentados na época e que repercutem até aos dias atuais, no Brasil: a falta de mão de obra qualificada nos canteiros de obra. Paralelamente, a busca por estruturas mais duráveis e resistentes se intensificou, tornando essencial seguir a técnica apropriada para a construção de cada elemento estrutural em uma edificação. O concreto desenvolvido foi proposto com a finalidade da criação de uma mistura capaz de fluir sob a ação de seu próprio peso, de modo a dispensar a etapa de vibração ou compactação presente no processo de execução do concreto convencional (CCV) (OKAMURA, 1997). Com isso, a eficiência nas atividades relacionadas à concretagem de uma peça estrutural se torna mais satisfatória, uma vez que a utilização do CAA está relacionada à sua facilidade de aplicação, reduzindo os esforços durante as fases de lançamento, espalhamento e adensamento da mistura.

As grandes empresas brasileiras da indústria de estruturas pré-moldadas estão aderindo ao CAA e dispensando a utilização de CCV em sua produção (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). Uma vez que os materiais e equipamentos são mantidos os mesmos, observam-se mudanças nas técnicas de execução, mais evidentemente na fase de adensamento, sendo obtidas peças de concreto mais resistentes e com melhor acabamento final a custos reduzidos. Cabe mencionar que não há restrição do uso de CAA em relação ao CCV, sendo que, segundo Kraus (2006), o mesmo pode ser aplicado em: edifícios, pontes, pré-fabricados, barragens, túneis, pontes, tanques, CAA na forma de alta resistência, CAA na forma de concreto leve, entre outras.

É essencial garantir ao concreto as seguintes características para que o mesmo seja classificado como autoadensável: capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (EFNARC, 2005). Contudo, para que

se obtenha uma mistura com as características mencionadas, é necessária a utilização de adições minerais e aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade, além dos materiais já utilizados no CCV.

Tutikian e Dal Molin (2015) esclarecem que a capacidade de preenchimento se resume na facilidade do concreto fluir na fôrma de modo a ocupar todos os seus espaços. Já a habilidade passante está relacionada com a capacidade de o concreto escoar na fôrma de modo a passar por entre as armaduras sem impedimentos ou causando segregação. Por último, a resistência à segregação se refere à coesão do material, ou seja, a capacidade do material de se manter conexo independente do caminho percorrido.

O uso de adições minerais promove tanto benefícios técnicos quanto ambientais, pois, normalmente, estas adições são resíduos provenientes de atividades industriais. Neste caso, por exemplo, a cinza volante é um material residual proveniente da combustão do carvão mineral em usinas termoelétricas. Os benefícios técnicos se referem à minimização dos efeitos negativos de segregação e exsudação do concreto, assim como o aumento da compactidade do concreto através de uma redução na quantidade de vazios do concreto. Sob uma perspectiva ambiental os benefícios estão relacionados principalmente à adoção de materiais residuais de segmentos industriais, cujo descarte inadequado pode levar à impactos significativos sobre o meio ambiente (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

2. OBJETIVO

Com a intenção de avaliar o desempenho no estado endurecido, o presente trabalho compara um traço de concreto CAA, dosado pelo método de Gomes et al. (2003), com a utilização da adição mineral de cinza volante, com um traço de concreto CCV, produzido com os mesmos materiais, sendo avaliados as propriedades mecânicas no que tange a resistência à compressão uniaxial, a resistência à tração por

compressão diametral, o módulo de elasticidade e a absorção de água por capilaridade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto autoadensável consiste em um concreto de alto desempenho que no estado fresco apresenta a característica autoadensável e no estado endurecido oferece maior proteção contra os fatores externos, devido à sua menor porosidade (OKAMURA e OUCHI, 2003). Apesar de o concreto autoadensável apresentar inúmeras vantagens no estado fresco, são suas propriedades no estado endurecido que interessam os projetistas estruturais, podendo ser sintetizadas de modo a se avaliar os seguintes parâmetros: microestrutura, resistência à compressão, módulo de elasticidade, aderência e durabilidade. Entretanto, no estado endurecido o CAA apresenta maior tendência à retração em relação ao CCV, que ocorre em função da grande quantidade de finos e elevados percentual de pasta de cimento (PERIUS, 2009).

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm avaliado as propriedades mecânicas do concreto autoadensável no estado endurecido comparando seu desempenho em uso estrutural ao concreto convencional. Segundo Domone (2007), as resistências à tração e compressão no concreto autoadensável são similares às do concreto convencional, entretanto o módulo de elasticidade pode ser até 40% menor no concreto autoadensável para concretos de baixas resistências à compressão, próximo a 20 MPa, e 5% menor em concretos de alta resistência, acima de 90 MPa, em relação ao concreto convencional.

Esta redução do módulo de elasticidade no concreto autoadensável é ocasionada pelo menor volume de agregados graúdos e aumento do volume de pasta do concreto, acarretando em maiores deformações nas estruturas nos estados limites de serviço e último (DESNERCK et al., 2009; BOEL; DE CORTE, 2010).

Por outro lado, Parra et al. (2011) ressaltam que além do adensamento mais

eficiente, o uso de aditivos superplastificantes e a redução da relação água/cimento são responsáveis por um aumento da resistência à compressão do concreto autoadensável em relação ao concreto convencionalmente vibrado mecanicamente.

Segundo Cattaneo et al. (2012) devido à maior quantidade de materiais finos e reduzido volume de agregado graúdo, o concreto autoadensável apresenta uma microestrutura mais densa, o que afeta o comportamento estrutural, apresentando menor fissuração e conseqüentemente maior durabilidade. Como a utilização de pozolanas é comum no concreto autoadensável, principalmente a sílica ativa e a cinza volante, que são partículas muito mais finas do que as partículas de cimento, nestes casos pode ocorrer uma melhoria na resistência da interface, dada a atividade pozolânica das mesmas, influenciando diretamente nas propriedades mecânicas do material.

Entretanto, estes efeitos não foram observados por Persson (2001) e Castel et al. (2010), que realizaram ensaios de caracterização mecânica em concretos convencionais e autoadensáveis não constatando diferenças significativas entre estes materiais.

A substituição do cimento por cinza de casca de arroz em concretos autoadensáveis foi avaliada nas propriedades no estado fresco por Safiuddin et al. (2012), constatando que substituições entre 10% e 15% resultaram em melhoria na fluidez e na resistência à segregação, aumentando levemente a massa específica do concreto.

Madandoust e Mousavi (2012) caracterizaram concretos autoadensáveis no estado fresco e endurecido com substituição de cimento por metacaulim, constatando o aumento das resistências à compressão e a tração, além da redução da absorção do concreto. Entretanto quando utilizada substituição acima de 15% foi constatada uma redução na fluidez, sugerindo um valor ótimo para substituição igual a 10%.

Bouzuoubaâ e Lachemi (2001) avaliaram a produção de concreto autoadensável com substituição do cimento por cinza volante em grandes proporções, sendo a substituição de 50% a que apresentou o melhor resultado em termos econômicos, com resistência à compressão em torno de 35 MPa e apresentando temperatura nas primeiras 24 horas entre 5°C e 10°C inferiores ao concreto sem substituição.

Hassan et al. (2012) compararam a substituição de cimento por metacaulim e por cinza volante no concreto autoadensável na mesma proporção, constatando o aumento da viscosidade e da habilidade passante em relação ao concreto de referência sem substituição. Os resultados também demonstraram que a substituição de cimento por até 8% de cinza volante apresentou resultados melhores que a substituição por metacaulim.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram desenvolvidos concretos autoadensáveis e concretos convencionais com o foco de avaliar suas propriedades em estado fresco e endurecido. Assim, para produção dos concretos foram

utilizados materiais disponíveis na região de Toledo – Paraná, sendo utilizado como aglomerante cimento Portland tipo II–Z–32, agregado graúdo proveniente da britagem de rochas basálticas, com dimensão máxima característica igual a 9,52 mm e massa específica de 3,03 g/cm³, e como agregado miúdo areia natural proveniente do rio Paraná, com módulo de finura igual a 2,90 e massa específica igual a 2,88 g/cm³.

Além disso, para obter a trabalhabilidade e viscosidade no concreto autoadensável foi utilizado aditivo superplastificante a base de Éter Policarboxilato (TecFlow 8000) e uma adição mineral de cinza volante. Na Tabela 1 são apresentadas as especificações da cinza volante fornecidas pelo fabricante, a qual foi ensaiada pelo método de Blaine obtendo-se uma superfície específica igual a 2.586,31 cm²/g. Nesta fase, também foram realizadas análises de difração de raios-X utilizando um difratômetro Paranalytical Empyrean, utilizando radiação CuK α com 40 kV no intervalo de 5° a 70° de 2 θ , com passos de 0,02° e tempo de contagem 10 segundos, obtendo-se como resultado, para componentes principais, a mullita 3(Al₂O₃).2(SiO₂) e o quartzo (SiO₂), conforme apresentado no difratograma na Figura 1.

TABELA 1: Propriedades da cinza volante.

Propriedades	Especificações
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	> 70 %
SO ₃	< 5%
Teor de umidade	< 0,05%
Perda ao fogo	< 2%
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	< 1,5%
Índice de atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias	> 75%
Índice de atividade pozolânica com o cal aos 7 dias	> 6,0MPa
Água requerida	< 110%

FONTE: Pozo Fly, 2017.

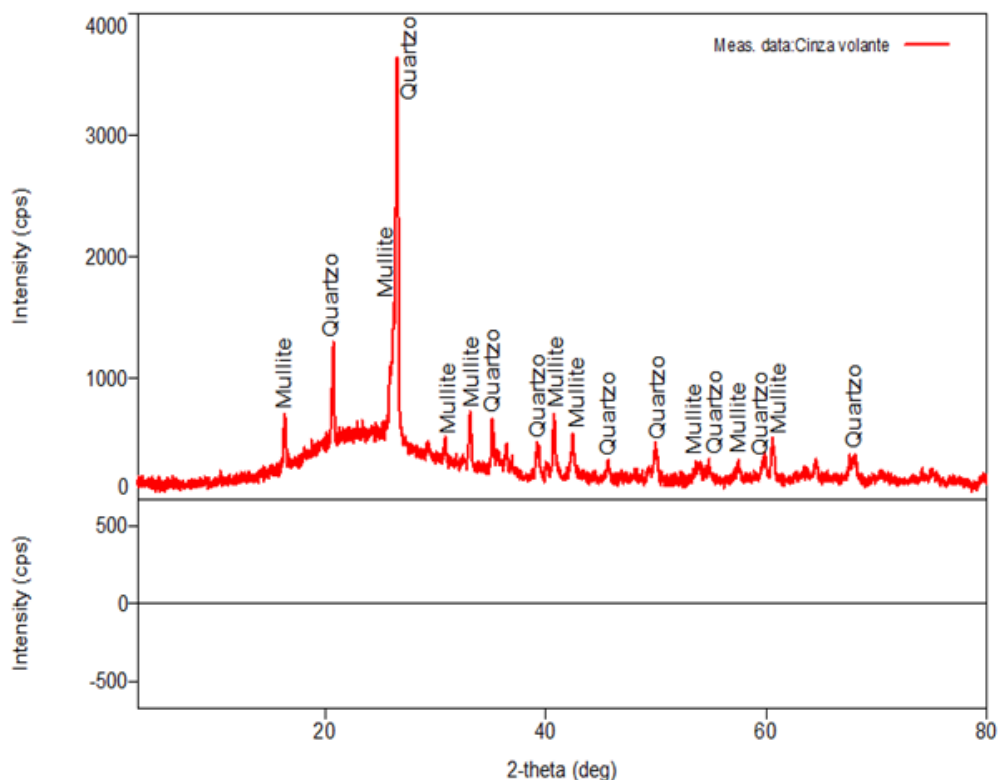


FIGURA 1: Difractometria de Raios-X da amostra de cinza volante.

FONTE: Autoria própria.

4.1 DOSAGEM DOS CONCRETOS

4.1.1 Concreto autoadensável

O concreto autoadensável foi dosado utilizando o método proposto por Gomes et al.,(2003). O esqueleto granulométrico, composto pelos agregados graúdos e miúdos, foi definido pelo empacotamento, adotando-se a mistura com menor quantidade de vazios, resultando na proporção de 50% de agregado graúdo e 50% de agregado miúdo.

Para análise da composição da pasta para análise da composição da pasta foram definidas diferentes proporções de adição de cinza volante, 10%, 20% e 30%, sendo realizado o ensaio de escoamento com o cone de Marsh (Figura 2) para determinar a proporção de aditivo capaz de atingir o ponto de saturação, e também para uma mistura de referência sem adição de cinza volante, sendo mantida a relação entre água e cimento inicialmente definida de 0,4. Quanto maior a proporção de material fino, maior o tempo de

escoamento da mistura, de modo a reduzir sua fluidez, sendo possível constatar, por meio da angulação da reta apresentada no gráfico, que o ponto de saturação do aditivo correspondeu a 0,2% nos casos sem e com 10% de adição, enquanto para as misturas com 20 e 30% de adição foi de 0,4%.

Em sequência, foram definidos o ponto de saturação do aditivo e a quantidade de finos da pasta, de modo a verificar os teores ideais capazes de promover a fluidez da mistura, empregando o ensaio do Cone de Marsh para verificação da pasta e o ensaio de mini-slump (Gomes, 2002). O ponto de saturação do aditivo obtido foi de 0,2% nos casos sem e com 10% de adição, enquanto para as misturas com 20% e 30% de adição foi de 0,4%. Entretanto, no ensaio de espalhamento somente a mistura com 20% de adição e 0,40% de teor de aditivo apresentou resultado satisfatório, com tempo de espalhamento T115 de 2,04 segundos e um espalhamento final de 176 mm.

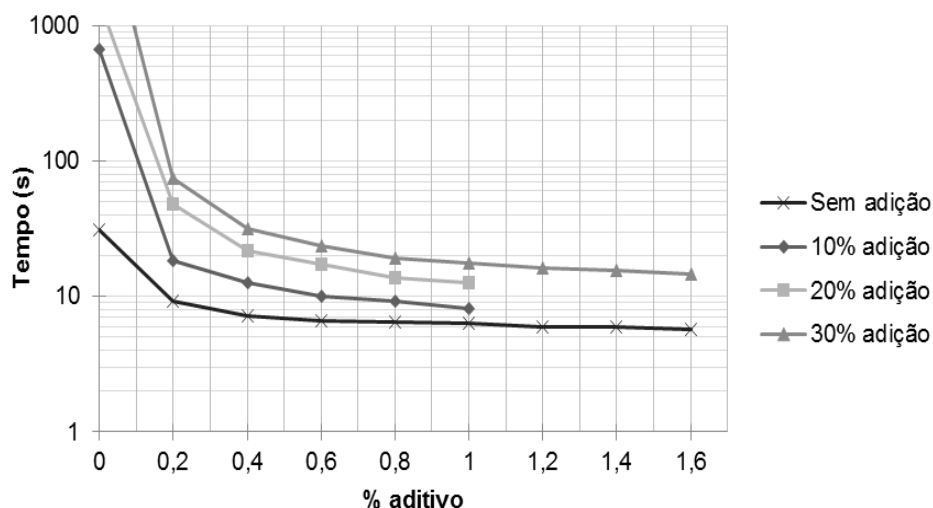


FIGURA 2: Curva de saturação do aditivo superplastificante.

FONTE: Autoria própria.

Com base nos dados anteriores, o volume de pasta necessário para obter o concreto autoadensável foi determinado, resultando em 84,69% da composição do concreto. Desta forma, foram calculados os consumos de materiais para a produção de 1m³ de concreto, conforme apresentado na Tabela 2.

4.2.2 Concreto convencionalmente vibrado

O concreto convencional foi definido a partir do traço de CAA, substituindo, em volume, a cinza volante por agregado miúdo e proporcionando o aditivo superplastificante durante a produção do concreto, conforme resultado de abatimento do tronco de cone, mantendo fixos o consumo de cimento por m³ de concreto e a relação água/cimento, conforme

apresentado na Tabela 3.

4.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA

Para produção dos concretos os materiais foram misturados utilizando uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de produção de 100 litros. Inicialmente foram inseridos na betoneira os agregados graúdos e miúdos e misturados com metade da água durante um minuto. Em seguida foi adicionado o cimento, a cinza volante e o restante da água e continuada a mistura por mais dois minutos, sendo então adicionado o aditivo superplastificante. Na produção do concreto convencional utilizou-se o mesmo procedimento, porém sem adição da cinza volante.

TABELA 2: Consumo de materiais para produção de 1 m³ de CAA.

Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Cinza volante (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Água (L)
472,93	841,84	841,84	94,62	4,75	189,23

FONTE: Autoria própria.

TABELA 3: Consumo de materiais para produção de 1 m³ de CCV.

Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Cinza volante (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Água (L)
472,93	985,33	843,22	-	2,53	189,23

FONTE: Autoria própria.

4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO

No estado fresco o concreto autoadensável foi caracterizado quanto à sua fluidez e escoamento através do ensaio de espalhamento pelo método do cone de Abrams (NBR NM67, 2013), habilidade passante através do método da caixa L (NBR 15823, ABNT, 2010) e viscosidade pelo método do funil V (NBR 15823, ABNT, 2010), enquanto para o concreto convencionalmente vibrado mecanicamente foi determinada sua consistência pelo abatimento do tronco de cone conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998). Além disso, a massa específica dos concretos no estado fresco foi determinada conforme norma NBR 9833 (ABNT, 2008).

No estado endurecido foram determinadas: a resistência à compressão uniaxial (aos 7, 14 e 28 dias), a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade (aos 28 dias) e a absorção de água por capilaridade, corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura), seguindo as recomendações das normas NBR5739 (ABNT, 2007), NBR7222 (ABNT, 2010), NBR8522 (ABNT, 2008) e NBR 9778 (ABNT, 2009), respectivamente.

Outro recurso utilizado neste trabalho, a critério de comparação, fora a microscopia eletrônica de varredura (MEV) com amostras dos traços de concreto endurecido aos 28 dias, de modo a compreender as diferenças entre a microestrutura dos concretos produzidos. Para tanto, as imagens foram obtidas através da análise de MEV, em um equipamento TESCAN VEGA 3. O preparo da amostra se deu pelo espalhamento no porta amostras sobre uma fita de carbono dupla face secas e metalizadas com uma fina cama de ouro na superfície (“sputtering”). As micrografias foram obtidas em aumentos de 1000 vezes em módulo SE com detector de elétrons secundários.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A Tabela 4 apresenta os resultados dos

ensaios de espalhamento, habilidade passante e viscosidade do concreto dosado pelo método de Gomes et al. (2003). Segundo a NBR 15823 (ABNT, 2010), o espalhamento entre 660 e 750 mm permite classificar o concreto como SF2, sendo recomendado para a maioria das aplicações estruturais correntes (vigas, pilares, paredes, entre outras), confirmado pelo tempo de espalhamento para atingir o diâmetro de 500 mm superior a 2 segundos e o tempo de funil V entre 9 e 25 segundos, que confirma efeito tixotrópico do concreto, acarretando em uma menor pressão sobre as fôrmas. A relação entre as alturas na caixa L superior a 0,8 para caixa com três barras de aço classifica o concreto como adequado para elementos estruturais com espaçamentos de armadura entre 60 mm a 80 mm.

O concreto convencional apresentou abatimento de tronco de cone de apenas 40 mm, sendo classificado pela NBR 8953 (2015) como um concreto classe S10. Neste ponto, segundo Neville e Brooks (2013) trata-se de um concreto de baixa trabalhabilidade. As massas específicas dos dois tipos de concreto no estado fresco apresentaram valores próximos, indicando que não houve maior incorporação de ar na produção do CAA.

5.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial média nas idades de 7, 14 e 28 dias e os respectivos desvios padrão das amostras, são apresentados na Tabela 5.

Apesar de utilizar os mesmos materiais, com exceção do uso de sílica ativa, e a mesma relação água cimento, verifica-se que o CAA apresentou resistências à compressão em torno de 40%, 35% e 27% superiores ao CCV para as idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

A Figura 3 apresenta a evolução da resistência à compressão dos concretos ensaiados. O concreto autoadensável apresentou maior resistência nas idades iniciais, com variação de resistência média entre 7 e 28 dias igual a 25%, enquanto neste período o concreto convencionalmente vibrado apresentou uma variação de 38%. w/cm.

TABELA 4: Resultados dos ensaios dos concretos no estado fresco.

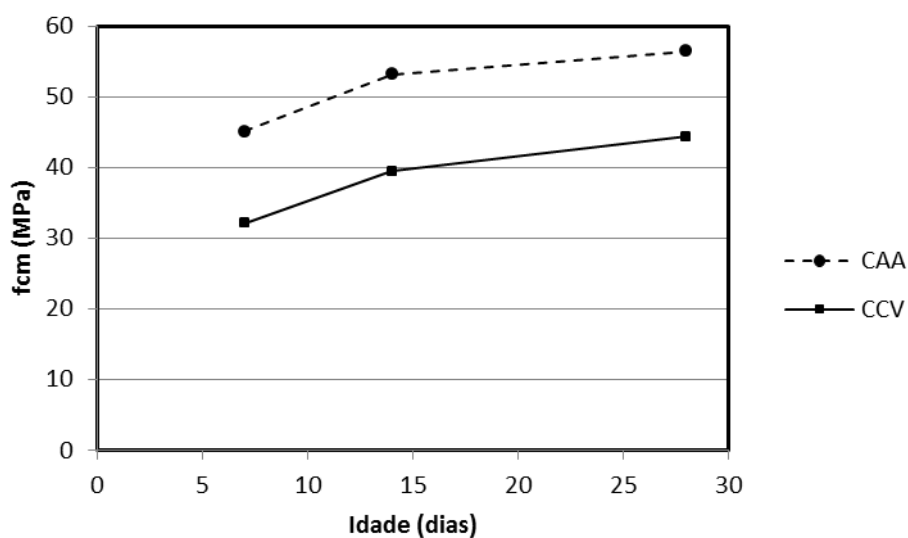
Ensaio	CAA	CCV
Espalhamento (mm)	730mm	-
Tempo de Espalhamento (T_{500mm}) (s)	5,57s	-
Funil-V (s)	9,37s	-
Caixa-L	0,952	-
Abatimento (mm)	-	40
Massa específica (g/cm^3)	2,4	2,38

FONTE: Autoria própria.

TABELA 5: Resistência à compressão axial e desvio padrão para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Concreto	7 dias		14 dias		28 dias	
	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão (MPa)
CAA	45,1	1,81	53,2	3,22	56,4	4,52
CCV	32,1	4,78	39,5	2,31	44,4	2,83

FONTE: Autoria própria.

**FIGURA 3:** Evolução da resistência à compressão para as idades de 7, 14 e 28 dias.

FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade realizados aos 28 dias de idade, com seus respectivos desvios padrão.

Observando os valores de resistência à tração é possível notar que os mesmos são ordem de 10% do valor da resistência à compressão para

ambos os tipos de concreto ensaiados. Neste ponto, observa-se que assim como nos ensaios de compressão, a resistência à tração apresentou maior valor médio para o CAA em relação aos valores obtidos para o CCV, da ordem de 35%, mesmo o CCV sendo vibrado mecanicamente. Tal fato está relacionado a uma presença mais significativa de vazios em concretos

convencionais, mesmo adensados mecanicamente, do que em concretos autoadensáveis, assim, demonstra-se com base nestes resultados que, para o caso em questão, a adoção de um concreto autoadensável remete à benefícios significativos em termos das propriedades mecânicas do concreto.

Com relação ao módulo de elasticidade a variação observada entre o CCV e o CAA foi da ordem de 9%, todavia, nota-se que o desvio padrão obtido para o CAA é menor do que o apresentado para o CCV, demonstrando que, em termos qualitativos, a produção de um concreto

autoadensável é mais vantajosa.

5.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILAREIDADE E ÍNDICE DE VAZIOS

O ensaio de absorção de água por capilaridade e índice de vazios fora realizado na idade de 28 dias dos concretos, sendo os resultados apresentados na Tabela 7. O concreto autoadensável apresentou menor absorção de água por capilaridade e menor índice de vazios em relação ao CCV, atribuída ao refinamento da estrutura porosa, com a menor presença de vazios.

TABELA 6: Resistência à tração e módulo de elasticidade dos concretos.

Concreto	Resistência à tração		Módulo de elasticidade	
	f_{tm} (MPa)	Desvio padrão (MPa)	E (GPa)	Desvio padrão (MPa)
CAA	4,49	0,53	32,23	0,49
CCV	3,36	0,58	29,73	2,57

FONTE: Autoria própria.

TABELA 7: Absorção e índice de vazios.

Concreto	Absorção		Índice de vazios	
	Média (%)	S (%)	Média (%)	S (%)
CAA	4,02	0,56	9,18	1,20
CCV	6,34	0,29	14,09	0,60

FONTE: Autoria própria.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é o recurso utilizado para compreender e comparar a microestrutura dos concretos desenvolvidos. A Figura 4 apresenta as imagens obtidas na MEV para o CAA (Fig. 4a) e CCV (Fig.4b) para aumento de 1000 vezes. É possível observar a partir da Figura 4 que concretos CAA apresentam uma estrutura mais densa em relação à concretos CCV, onde uma menor incidência de defeitos como fissuras, ar aprisionado e macroporos é passível de ser notada. Em concordância com estas observações estão as propriedades mecânicas analisadas, justificando assim, os maiores valores médios obtidos para o CAA em relação ao CCV. Além disso, a presença dos poros evidenciados por meio das micrografias obtidas corrobora para a evidência de maior absorção de água por capilaridade e, também, para os índices de vazios descritos anteriormente. Tais análises levam a concluir que, sob aspectos mecânicos e de durabilidade, concretos autoadensáveis apresentam melhor desempenho frente à concretos convencionais mesmo sendo aplicado um procedimento de adensamento mecânico com o objetivo de reduzir a quantidade de vazios existentes no concreto.

6. CONCLUSÕES

As propriedades no estado fresco e endurecido de um traço de concreto autoadensável foram comparadas às de um concreto convencionalmente adensado mecanicamente, produzido com os mesmos materiais, sendo, a partir dos resultados, obtidas as seguintes conclusões:

- Apesar das grandes diferenças no estado fresco quanto à trabalhabilidade, as massas específicas dos concretos não apresentaram variação, indicando que não houve variação na incorporação de ar durante a mistura.
- O ensaio de resistência à compressão uniaxial revelou que o CAA apresentou melhor desempenho em todas as idades, uma vez que este indica maiores valores de resistência em todas as idades ensaiadas. Aos 28 dias a resistência de tração, obtida pelo ensaio por compressão diametral, apresentou o mesmo comportamento da resistência à compressão.

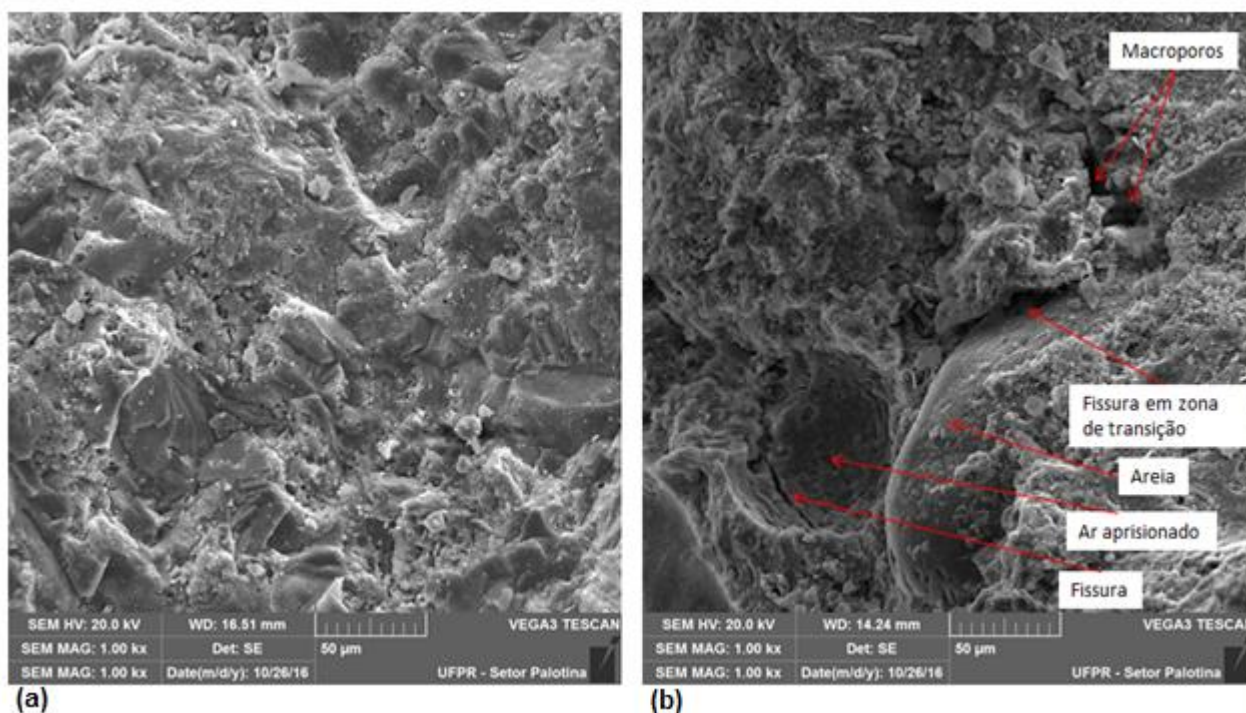


FIGURA 4: Microscopia eletrônica de varredura com aumento 1000 x (a) CAA (b) CCV.

FONTE: Autoria própria.

- Verifica-se que o CAA possui o maior valor de módulo de elasticidade, representando cerca de 8% a mais do que os dados observados para o CCV.
- A absorção de água por capilaridade e o índice de vazios são diretamente proporcionais, ou seja, na medida em que a absorção aumenta também aumenta o índice de vazios.
- A microscopia eletrônica de varredura revela as microestruturas do concreto observado, sendo que as imagens garantem o apresentado nos índices de vazio e absorção do concreto. Observa-se principalmente a presença de ar aprisionado, partículas soltas e microporos no CAA, enquanto o CCV apresenta poros um pouco maiores e poucos sinais de ar aprisionado.

Desta forma, este trabalho contribui para a difusão do concreto autoadensável e seu uso em construções usuais, resultando em estruturas de concreto duráveis e confiáveis, reduzindo a necessidade de manutenções.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela disponibilização de equipamentos e apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7222**: Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009

_____. **NBR 15823**: Concreto auto-adensável. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BOEL, V.; DE CORTE, W. **Reinforced Self-Compacting Concrete Beams Subjected to Static and Dynamic Loads**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 6., 2010, Montreal. Proceedings... Montreal: 2010, Vol. II, p. 1173-1182.

BOUZOUBAË, N.; LACHEMI, M. **Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash - Preliminary results**. Cement and Concrete Research, v. 31, p. 413-420, 2001.

CASTEL, A.; VIDAL, T.; FRANÇOIS, R. **Bond and cracking properties of self-consolidating concrete**. Construction and Building Materials, v.24, p. 1222-1231, 2010.

CATTANEO, S.; GIUSSANI, F.; MOLA, F. **Flexural behaviour of reinforced, prestressed and composite self-consolidating concrete beams**. Construction and Building Materials, v.36, p. 826-837, 2012.

DESNERCK, P.; DE SCHUTTER, G.; TAERWE, L. **Shear friction of reinforced self-compacting concrete members**. American Concrete Institute, Special publication 261-9, p. 133-141, 2009.

DOMONE, P.L. **Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies**. Cement & Concrete Composites, n. 26, p. 197-208, dez. 2007.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Maio, 2005.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais**. In: Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, 2003.

HASSAN, A. A. A.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K. M. A. **Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete**. Cement and Concrete Composites, v. 34, p. 801-807, 2012.

KRAUS, Z. F. **Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto auto-adensável contendo ora fíler calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao fíler.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

MADANDOUST, R.; MOUSAVI, S. Y. **Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin.** Construction and Building Materials, v. 35, p. 752–760, 2012.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials.** Ottawa, Canadá: Gordon and Breach Publishers, 1996. 1 v.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OKAMURA, H. **Self-compacting high performance concrete.** Concrete international, v. 19, n. 7, p. 50-54, jul. 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, K. **Self-compacting concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology. Tóquio, p. 5-15. abr. 2003.

PARRA, C.; VALCUENDE, M.; GÓMEZ, F. **Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete.** Construction and Building Materials, v. 25, p. 193-198, 2011.

PERIUS, G. R. **Influência das propriedades físicas de agregados reciclados sobre a retração por secagem em concreto auto-adensável.** 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PERSSON, B. **A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete.** Cement and concrete research, v. 31, p. 193-198, 2001.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J. S.; SOUDKI, K.A. **Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material.** Construction and Building Materials, v.30, p. 833–842, 2012.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto autoadensável.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2015. 144 p.