

PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Kelvya Maria de Vasconcelos Moreira¹; Antônio Eduardo Bezerra Cabral²

Resumo

O Concreto Autoadensável (CAA) surgiu como uma evolução na tecnologia de concretos, caracterizando-se por ser um material bastante fluido que não precisa de vibração para seu adensamento e, ao mesmo tempo, possuir viscosidade suficiente para impedir a segregação dos agregados. Os requisitos de qualidade e durabilidade favoráveis aliados à rapidez na execução tornaram o CAA concorrente do concreto convencional. Pesquisas estão sendo desenvolvidas para descobrir todo o potencial que este tipo de concreto reserva. Sabendo que a incorporação de material reciclado na construção civil já é uma realidade necessária em face da escassez de matéria-prima natural e do elevado volume de entulho gerado por esta indústria, neste trabalho foi avaliado o comportamento de CAA produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto. O programa experimental envolveu a produção de CAA com relações a/c iguais a 0,35, 0,45 e 0,55, e porcentagens de substituição de 10%, 20% e 30% de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto, para estudo das características dos CAA no estado fresco e endurecido. Para o estado fresco, seguiram-se as análises recomendadas na norma brasileira NBR 15.823/2010 e para o estado endurecido foram analisadas a propriedade mecânica de resistência à compressão axial e a propriedade de absorção de água por imersão, ligada a durabilidade, ambas aos 28 dias de idade. Evidenciou-se que há potencial para a incorporação de agregado reciclado no CAA e sugere-se a ampliação do estudo com uso de maiores porcentagens de agregado graúdo reciclado para a relação a/c igual a 0,35, que apresentou resultados mais relevantes.

Palavras-chave: concreto autoadensável; agregados reciclados; propriedades mecânicas e de durabilidade.

Introdução

O guia europeu de recomendações para a especificação, o uso e a produção do CAA (*European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*) (ERMCO, 2005) define o concreto autoadensável como um concreto inovador que não necessita de vibração para o adensamento e compactação, sendo capaz de fluir sob o seu próprio peso, enchendo completamente a fôrma e alcançando compactação completa, mesmo na presença de alta taxa de armadura. No estado endurecido, o CAA é um concreto denso, homogêneo e deve ter as mesmas propriedades mecânicas e de durabilidade de um concreto tradicional vibrado.

Silva Filho (2012), em reportagem sobre o futuro da construção, acredita que o concreto autoadensável será um componente de praxe na construção civil e deverá virar o novo "convencional".

Sob a ótica da responsabilidade ambiental, Mehta e Monteiro (2008) entendem que para reduzir o impacto ambiental da indústria do concreto a melhor abordagem de longo prazo seria buscar a redução de seu consumo. Porém, admitindo que esta seja uma realidade ainda distante, os autores acreditam que é necessário promover o desenvolvimento industrial sustentável. Esta prática implica em reciclar os resíduos produzidos pela indústria para que substituam a matéria-prima *in natura* da própria indústria ou de outras.

Desta forma, entendendo que o volume de resíduos da própria indústria da construção civil vem crescendo exponencialmente e que as formas de descarte atualmente empregadas, em sua maioria, são prejudiciais ao meio ambiente, o trabalho em questão objetivou produzir concretos autoadensáveis com substituição de parcela dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto e estudar suas propriedades no estado fresco e endurecido.

Materiais e Método

▪ Materiais

Utilizou-se o cimento Portland CP II-Z-32-RS, com massa específica de 3,0 g/cm³, por ser o mais comercializado em Fortaleza/CE. A água foi proveniente do sistema de abastecimento público da cidade.

A adição mineral utilizada foi um filer calcário com massa específica de 2,68 g/cm³. Realizou-se a determinação da distribuição dos grãos por meio da granulometria a laser. Como resultado obteve-se um diâmetro médio de 23,08 µm, com valores de D10%, D50% e D90%, respectivamente, iguais a 1,19 µm, 5,55 µm e 62,51 µm.

Utilizou-se como agregado miúdo natural uma areia quartzosa lavada proveniente de leito de rio. Os agregados graúdos naturais eram de origem granítica e apresentavam dois diâmetros máximos. Para uma melhor distinção entre eles foi denominado de pedrisco o agregado graúdo natural de menor diâmetro máximo, e de brita o de maior diâmetro máximo.

O agregado graúdo reciclado foi proveniente da britagem, em um britador de mandíbulas, de resíduos de demolição de uma série de edificações e de pavimentos da cidade de Fortaleza/CE. Estes resíduos eram constituídos somente de concretos e o agregado reciclado resultante da britagem foi denominado de brita reciclada.

Os dados da caracterização física para todos os agregados estão apresentados na Tabela 1.

O aditivo utilizado foi um superplastificante de terceira geração à base de éter policarboxílico com 30% de sólidos.

Tabela 1 - Caracterização física dos agregados.

Índice Físico	Areia	Pedrisco	Brita Natural	Brita Reciclada	Método de Ensaio
Diâmetro máximo (mm)	2,40	9,50	19,00	19,00	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	2,52	5,78	6,74	6,86	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica (g/cm ³)	2,54	2,46	2,74	2,35	NBR NM 52 (ABNT, 2003) - areia NBR NM 53 (ABNT, 2003) - pedrisco e britas
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,25	1,35	1,48	1,30	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,37	1,46	1,59	1,40	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Absorção (%)	1,05	0,48	0,17	3,92	NBR NM 30 (ABNT, 2001) - areia NBR NM 53 (ABNT, 2003) - pedrisco e britas
Teor de material fino (%)	1,16	0,31	0,19	0,64	NBR NM 46 (ABNT, 2003)

▪ Método

Adotou-se o método de dosagem proposto por Gomes (2002) para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência. Este método é baseado na otimização da composição da argamassa e do esqueleto granular separadamente.

Desta forma, o método foi executado em três fases, para cada uma das relações a/c (0,35, 0,45 e 0,55): obtenção da composição da argamassa, determinação do esqueleto granular dos materiais secos e seleção do volume de pasta da mistura. A seguir foi detalhada cada fase do método.

Composição da argamassa:

O estudo da argamassa consistiu em determinar a relação superplastificante sólido/cimento (sp/c) utilizando o cone de Marsh descrito na norma europeia EN 445 (1996) e em determinar a relação filer/cimento (f/c) pelo tronco de cone da mesa de consistência, citado na NBR 7.215 (ABNT, 1996).

O método de ensaio para determinação da relação sp/c se baseou em adicionar 1 (um) litro de argamassa no cone e medir o tempo (T) para que a argamassa alcançasse a marca de 500 ml na proveta graduada. Para isso, fixaram-se a quantidade de cimento, areia, filer e água, variando apenas os teores de aditivo superplastificante de 0,05% em 0,05%. Após, traçou-se um gráfico log (T) versus sp/c para definição do ponto de saturação do superplastificante, caracterizado como a porcentagem ótima de aditivo, que corresponde a um ângulo interno de $140^\circ \pm 10^\circ$ na curva.

Os gráficos log (T) versus sp/c resultantes do ensaio para as relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55, estão mostrados nas figuras 1a, 1b e 2, respectivamente. Obteve-se relação sp/c de 0,50% para a relação a/c de 0,35; 0,25% para a relação a/c de 0,45; e 0,20% para a relação a/c de 0,55.

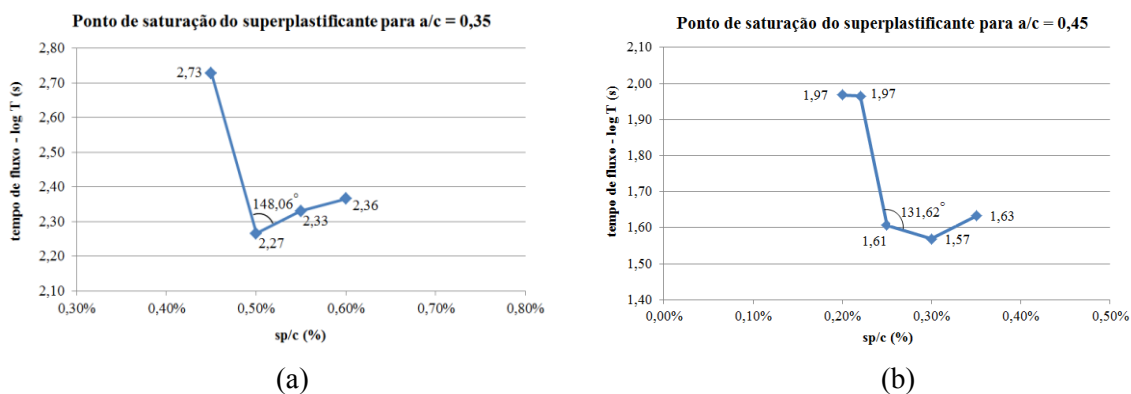


Figura 1 – Ponto de saturação do aditivo superplastificante (a) para a relação a/c=0,35 e (b) para a relação a/c=0,45.

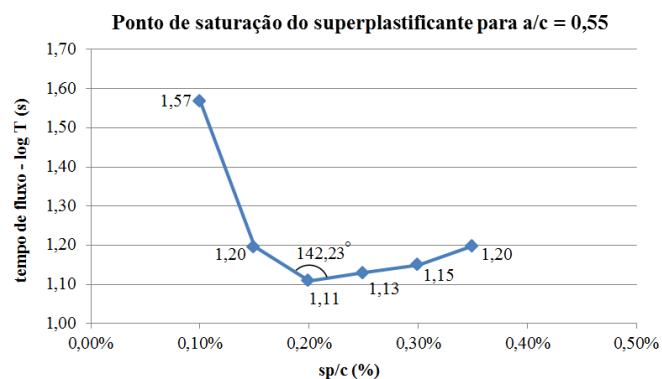


Figura 2 – Ponto de saturação do aditivo superplastificante para a relação a/c=0,55.

Após definida a relação sp/c, avaliou-se o comportamento de cada argamassa quanto à coesão, fluidez e segregação pelo tronco de cone da mesa de consistência. O ensaio consistiu em posicionar o tronco de cone sobre uma placa de vidro lisa e úmida, preenchê-lo com argamassa, cuja quantidade de materiais já foi definida pelo ensaio com o cone de Marsh, e levantar rapidamente o equipamento. Após cessar o fluxo da argamassa, mediram-se dois diâmetros perpendiculares. A média dos diâmetros deve estar entre 200mm e 300mm, conforme preconiza o método.

No estudo do Cone de Marsh fixou-se a relação f/c em 0,40. Pretendeu-se utilizar uma relação f/c inferior a adotada por Lisbôa (2004), Cavalcanti (2006) e Barros (2009) que usaram f/c = 0,50. Constatou-se pelo tronco de cone que a relação f/c = 0,40 era aceitável, pois os diâmetros médios alcançados para as relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55 foram 289mm, 205mm e 297mm, respectivamente.

Esqueleto granular dos materiais secos:

A proporção ideal dos agregados consiste em definir o conjunto de agregados que possua o menor índice de vazios pela realização do ensaio de massa unitária no estado solto, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), com posterior cálculo da massa específica e índice de vazios por meio das equações 1 e 2, respectivamente.

$$\gamma_{AB} = \frac{(\gamma_A * \%A) + (\gamma_B * \%B)}{100} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$\text{Vazios}_{AB} = \frac{\gamma_{AB} - M_{unitAB}}{\gamma_{AB}} * 100 \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde: γ_{AB} é a massa específica da mistura de agregados (kg/m^3); γ_A e γ_B são as massas específicas dos agregados A e B, respectivamente (kg/m^3); e $\%A$ e $\%B$ são as porcentagens de agregados A e B, respectivamente, incorporadas na mistura; Vazios_{AB} é o índice de vazios da mistura de agregados (%) e M_{unitAB} é a massa unitária da mistura obtida pelo ensaio (kg/m^3).

Desta maneira, efetuou-se o empacotamento da brita com o pedrisco, denominando-os de mistura 1; depois esta mistura foi empacotada com a areia, obtendo-se a mistura 2. Ao final, obteve-se a proporção ideal dos materiais secos utilizados na pesquisa: 30% de brita, 20% de pedrisco e 50% de areia.

Volume de pasta da mistura:

Conhecidas as relações sp/c e f/c e as proporções de agregados, procedeu-se à execução de um CAA para cada relação a/c, com um volume de pasta da mistura igual a 40% a fim de verificar as propriedades de coesão, viscosidade e segregação. Este volume de pasta foi o mesmo adotado por Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006).

Durante o estudo com a relação a/c igual a 0,35, verificou-se que era necessário alterar o teor de superplastificante, anteriormente definido em sp/c = 0,50%, para sp/c = 0,55%. De maneira análoga, o concreto com relação a/c igual a 0,45 sofreu ajuste no teor de superplastificante de sp/c = 0,25% para sp/c = 0,275%.

Atestou-se que o volume de 40% de pasta no concreto era viável e, então, definiram-se os traços como mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Traços unitários dos CAA.

Relação a/c	Relação sp/c	Traço Unitário		
		m	a	p
0,35	0,55%	3,24	1,59	1,65
0,45	0,275%	3,62	1,78	1,84
0,55	0,20%	4,00	1,97	2,03

De posse dos traços unitários, partiu-se para a produção dos CAA com substituição da brita natural por brita reciclada nas porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30%, para cada relação a/c, obtendo uma produção total de 12 concretos. As substituições foram efetuadas em volume, com compensação das massas devido a menor massa específica do agregado reciclado.

Baseando-se na indicação da NBR 15.116 (ABNT, 2004), foi efetuada uma pré-molhagem das britas recicladas com o teor de água igual a 80% da absorção da massa do agregado reciclado, 10 minutos antes da mistura.

Para cada CAA, realizaram-se os ensaios preconizados pela NBR 15.823 (ABNT, 2010), que avaliam as propriedades no estado fresco: espalhamento e tempo de escoamento (T500) pelo método do cone de Abrams, habilidade passante pelo anel J e pela caixa L, e viscosidade pelo funil V.

Para o estado endurecido, moldaram-se corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, seguindo a NBR 5.738 (ABNT, 2007), para análise da propriedade mecânica de resistência à compressão axial, com base na NBR 5.739 (ABNT, 2007); e análise da propriedade de absorção de água por imersão, de acordo com a NBR 9.778 (ABNT, 2005), ambas aos 28 dias de idade.

Resultados e Discussão

▪ Ensaio no estado fresco

A tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios no estado fresco.

Tabela 3 – Ensaio no estado fresco dos CAA.

Relação a/c	% de substituição	Espalhamento	T500	Anel J	Caixa L*	Funil V
0,35	0%	751 mm	5,27 s	46 mm	0,93	17,25 s
	10%	757 mm	4,94 s	27,5 mm	0,93	15,28 s
	20%	750 mm	7,59 s	25,5 mm	0,87	25,63 s
	30%	731,5 mm	5,75 s	25 mm	0,88	16,46 s
0,45	0%	745 mm	2,87 s	37,5 mm	0,85	8,60 s
	10%	552,5 mm	3,72 s	6,5 mm	0,42	7,06 s
	20%	645 mm	2,75 s	35 mm	0,56	6,84 s
	30%	615 mm	2,84 s	55 mm	0,50	5,37 s
0,55	0%	692,5 mm	2,00 s	42,5 mm	0,84	2,62 s
	10%	635 mm	1,50 s	85 mm	0,40	3,97 s
	20%	640 mm	1,50 s	95 mm	0,56	3,10 s
	30%	627,5 mm	1,50 s	37,5 mm	0,64	4,02 s

*adimensional

Numa análise geral, os CAA produzidos sem e com agregados graúdos reciclados de concreto apresentaram aspecto satisfatório quanto à coesão, viscosidade e segregação, viabilizando a continuidade do estudo.

Apenas o ensaio com a caixa L para os CAA modificados com relações = 0,45 e 0,55 apresentou resultados fora dos limites estabelecidos pela NBR 15.823 (ABNT, 2010), que estabelece valores a partir de 0,80 para caixas com 3 barras de aço, ainda que os concretos tenham fluído completamente pela caixa, contudo demandando maior tempo do que os CAA da relação a/c = 0,35.

▪ Resistência à Compressão Axial

Os resultados médios obtidos para a característica de resistência à compressão axial dos 12 traços rodados estão apresentados na Figura 3.

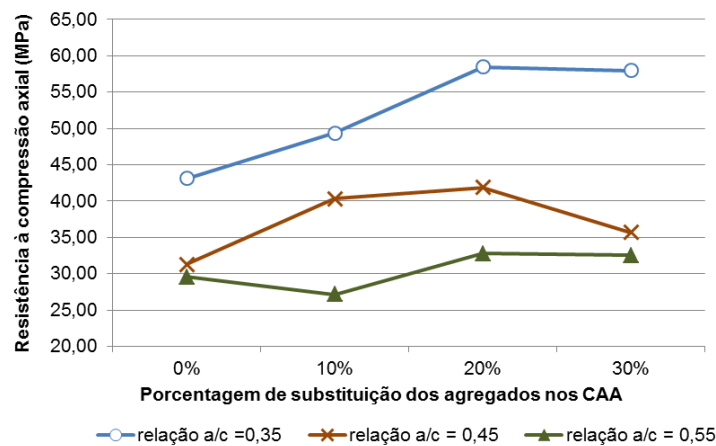


Figura 3 – Resistência à compressão axial dos CAA aos 28 dias.

Para todos os concretos verifica-se que a resistência foi afetada negativamente com o aumento da relação a/c. O concreto de referência da relação a/c=0,45 apresentou uma resistência à compressão média 27,40% inferior ao concreto de referência da relação a/c=0,35, enquanto que o concreto de referência da relação a/c=0,55 teve essa propriedade 5,50% inferior ao concreto da relação a/c=0,45.

É de conhecimento que concretos com relações a/c maiores apresentam resistências menores devido à diminuição da resistência da pasta, ocasionada pela maior quantidade de poros no concreto. Portanto, o resultado obtido apresenta coerência.

Os concretos com agregados reciclados, de forma geral, foram em torno de 22% superiores aos concretos referenciais, independente da porcentagem de brita reciclada, com exceção do CAA 10% da relação a/c=0,55 que foi 9,00% inferior ao seu respectivo concreto referencial.

Também foi constatado que na medida em que foram substituídas porcentagens maiores de agregado natural por reciclado, em média, a resistência aumentou, demonstrando que o agregado reciclado afetou positivamente esta propriedade.

▪ Absorção de Água por Imersão

Os resultados médios obtidos para a característica de absorção de água por imersão dos 12 traços rodados estão apresentados na Figura 4.

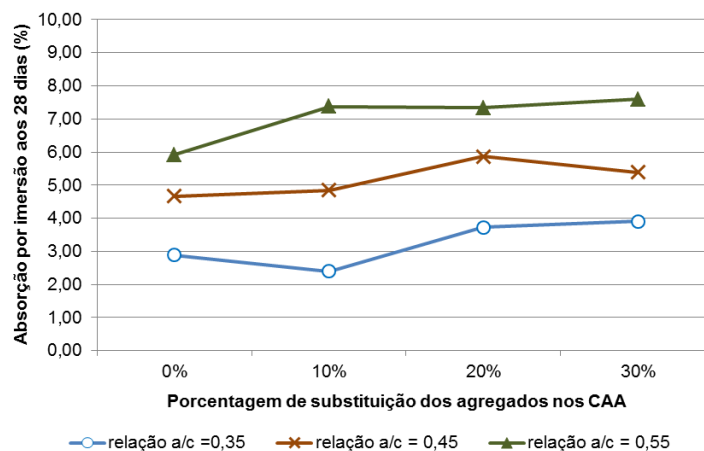


Figura 4 – Absorção de água por imersão dos CAA aos 28 dias.

Fazendo uma análise dos concretos referenciais, tem-se que o CAA de relação $a/c=0,45$ absorveu 61,80% a mais de água do que o CAA de relação $a/c=0,35$; por sua vez o CAA de relação $a/c=0,55$ absorveu 27,00% a mais de água do que o CAA de relação $a/c=0,45$. Verifica-se que houve um incremento da absorção de água à medida que a relação a/c aumentou, indicando coerência com a literatura. Para relações a/c maiores tem-se uma maior porosidade do concreto devido a maior quantidade de água livre na mistura. Maior quantidade de poros acarreta maior absorção e permeabilidade da água no concreto, que foi exatamente o encontrado nos resultados expostos na Figura 4.

Ao fazer uma comparação entre os CAA de relação $a/c=0,55$, que apresentaram maiores valores de absorção, constata-se que os CAA com 10%, 20% e 30% de brita reciclada absorveram 24,50%, 24,00% e 28,20%, respectivamente, a mais de água do que o CAA referencial. Isto é justificado porque os CAA com brita reciclada tendem a produzir concretos com maior quantidade de poros e, assim, com capacidade de absorver mais água.

Constatou-se, também, que não houve grande aumento na absorção de água com o aumento da porcentagem de brita reciclada, para as três relações a/c . Apenas o CAA 10% da relação $a/c = 0,35$ apresentou absorção inferior ao referencial; os demais aumentaram, em média, 23% em relação ao referencial.

Considerações Finais

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, até a porcentagem de 30%, para a produção de concretos autoadensáveis pode ser uma alternativa proveitosa para a indústria da construção civil, desde que a capacidade de absorção de água não seja um fator limitante.

A resistência axial apresentou melhorias à medida que foi incorporada mais brita reciclada. Credita-se a isso o fato do agregado reciclado poder ter melhorado a aderência da matriz do concreto.

Já a absorção de água dos concretos com brita reciclada foi maior do que a dos concretos referenciais, para as três relações a/c . A maior porosidade dos agregados reciclados comparada a dos agregados naturais pode ter influenciado para a maior absorção de água, ainda que tenha sido efetuada uma pré-molhagem, correspondente a 80% da massa de absorção dos agregados reciclados, antes da sua utilização.

Agradecimentos

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq; Laboratório de Raios X do Curso de Física da UFC; Laboratório de Materiais de Construção Civil do Curso de Engenharia Civil da UFC; Basf; Fábrica de Cimentos Votorantim; Indústria de Pré-Fabricados T&A; e Companhia Industrial de Cimento Apodi.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 30: Agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 45: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 46: Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 248: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5.738: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 5.739: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 7.215: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 9.778: Argamassa e concretos endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15.823: Concreto autoadensável: partes 1 a 6. Rio de Janeiro, 2010.

BARROS, A.R. Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço. Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2009. (dissertação de mestrado)

CAVALCANTI, D. J. de H. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: estruturas. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2006. (dissertação de mestrado)

EUROPEAN READY-MIX CONCRETE ORGANIZATION (ERMCO). European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. Mai, 2005.

GOMES, P.C.C. Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Barcelona, 2002 (tese de doutorado)

LISBÔA, E. M. Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2004. (dissertação de mestrado)

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3ª ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

NORMA EUROPÉIA. EN 445: Lechadas para Tendones de Pretensado - Métodos de Ensayo. CEN, 1996.

SILVA FILHO, L.C.P. Futuro da construção é incorporar resíduos de outras indústrias: reciclagem de concreto para agregado também é tendência mundial. Reportagem. 06 mar 2012. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/tecnologia-materiais>>. Acesso em: 07 mar 2012.

¹ Docente do Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual Vale do Acaraú-UVA. e-mail: kelvyamoreira@gmail.com

² Orientador. Prof. Dr. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará-UFC. e-mail: eduardo.cabral@ufc.br