

EMPREGO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO CARBONATADOS NA PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS

Jéssica Fröhlich

GMat/PPGEC – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – E-mail: <jeh_frohlich@hotmail.com>.

Tatiane Isabel Hentges

GMat/PPGEC – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – E-mail: <tatiisabel@yahoo.com.br>.

Marlova Piva Kulakowski

GMat/PPGEC – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – E-mail: <marlovak@unisin.br>.

RESUMO

Muitos estudos sobre a substituição dos agregados convencionais pelos agregados reciclados de resíduos de concreto (ARC) na produção de novos concreto vêm sendo realizados. O emprego do ARC, por apresentar maior porosidade, demanda maior volume de água, aumentando a relação água/cimento destes novos concretos. O ARC exposto à carbonatação sofre uma alteração em sua microestrutura, podendo diminuir sua porosidade. Este trabalho objetiva verificar o comportamento de concretos com ARC carbonatado e não carbonatado, no estado fresco e no estado endurecido. Foram realizados ensaios de absorção nos agregados reciclados. Mediu-se o abatimento de tronco cone dos concretos e a resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias. Observou-se uma diminuição da absorção de água no ARC carbonatado em relação ao não carbonatado. Os ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias não permitiram verificar diferenças significativas entre os concretos.

Palavras-chave: agregado reciclado de concreto, porosidade, carbonatação, resistência.

INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo. Para ter-se uma ideia, estima-se que o consumo no mundo em 2008 tenha sido na ordem de 11 bilhões de toneladas métricas por ano⁽¹⁾. Essa grande quantidade de concreto requer extração de grande quantidade de matéria-prima, tornando a construção civil o segundo setor que mais consome recursos naturais do mundo.

Ao longo dos anos vem sendo realizados estudos sobre as características físicas, mecânicas e outras propriedades dos resíduos de construção

e demolição, também chamados de RCD, visando seu emprego como agregados. O principal objetivo destes estudos é determinar a viabilidade da reinserção destes materiais na construção civil como matéria-prima.

O agregado reciclado de resíduos de concreto (ARC) em particular, é um tipo de RCD que está sendo estudado para a produção do concreto por apresentar maior homogeneidade em relação ao RCD misto. Diversos estudos foram realizados a partir de ensaios comparativos entre concretos

convencionais e concretos com substituição parcial de agregado natural pelo agregado reciclado de concreto, entre eles Werle et al.⁽²⁾ e Limbachiya et al.⁽³⁾. Observou-se que devido à alta porosidade do ARC, boa parte da água de amassamento é absorvida pelo agregado modificando as condições de trabalhabilidade dos novos concretos. Portanto, o concreto com ARC necessita de uma demanda de água maior para manter a mesma trabalhabilidade que os concretos produzidos com agregados naturais. Como a relação água/cimento é alterada se torna impossível a comparação direta das propriedades entre os concretos convencionais e os concretos produzidos com agregados reciclado de concreto⁽²⁾, o que torna necessário estudar formas de mitigar os efeitos da alta taxa de absorção dos ARC.

Um estudo realizado por Belin et al.⁽⁴⁾ com agregado reciclado de concreto submetidos a carbonatação mostrou que ARC carbonatado possui porosidade menor em relação aos ARC não carbonatados, pois a carbonatação tende a diminuir a taxa de absorção de água pelo agregado. A partir destes dados, pode-se inferir que a demanda de água de concretos com ARC carbonatados seja menor do que de concretos com ARC não carbonatados.

O objetivo deste trabalho é verificar a influência da carbonatação na absorção do ARC, bem como o comportamento de concretos com ARC carbonatado e não carbonatado, no estado fresco e no estado endurecido.

MATERIAIS

As características do **cimento** tipo CP-II-F-32 empregado estão na tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química, física e mecânica do cimento.

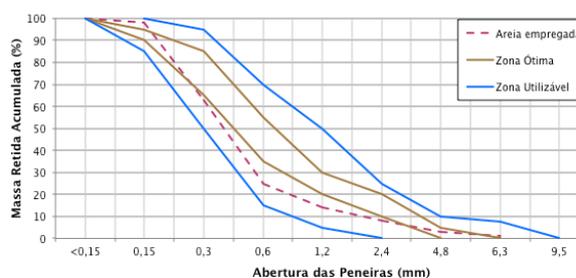
Parâmetro	Resultados
Al ₂ O ₃ (%)	4,12
SiO ₂ (%)	19,39
Fe ₂ O ₃ (%)	2,59
CaO (%)	60,78
MgO (%)	4,93
SO ₃ (%)	3,08
Perda ao Fogo (%)	6,08
CaO Livre (%)	2,24
Resíduo Insolúvel (%)	2

Equivalente Alcalino (%)	0,62
Expansão à Quente (mm)	1,00
Início de Pega (h:min)	3:30
Fim de Pega (h:min)	4:30
Água Cons.Normal (%)	26,30
Blaine (cm ² /g)	3.720
#200 (%)	4,2
#325 (%)	15,5
fc 1 dia (MPa)	16,9
fc 3 dias (MPa)	29,3
fc 7 dias (MPa)	36,6
fc 28 dias (MPa)	41,9
Massa específica (g/cm ³)	3,11

O **aditivo** utilizado no experimento é um aditivo superplastificante com densidade igual a 1,07 g/cm³, teor de cloretos menor do que 0,1 %, teor de álcalis menor que 1,0 % e dosagem recomenda em relação à massa de cimento de 0,2 a 5,0 %.

Uma areia quartzosa proveniente do Rio Jacuí, RS foi utilizada como **agregado miúdo**, com massa unitária de 1,52 g/cm³, massa específica igual a 2,55 g/cm³, dimensão máxima característica de 4,8 mm e módulo de finura igual a 2,11. A curva granulométrica do agregado miúdo é apresentada na figura 1.

Figura 1 - Curva Granulométrica do Agregado Miúdo Natural

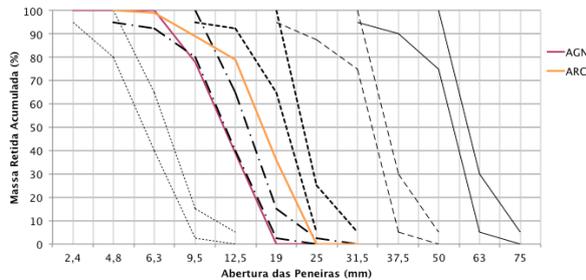


O **agregado gráudo natural** (AGN) utilizado para o ensaio foi uma brita basáltica proveniente de Garibaldi, Rio Grande do Sul. A massa unitária do AGN é 1,40 g/cm³ e a massa específica é 2,67g/cm³, dimensão máxima de 12,5 mm e módulo de finura de 6,78. A curva granulométrica do AGN está apresentada na figura 2.

O **agregado gráudo reciclado de concreto** (ARC) é proveniente de resíduos da produção de laje pré-fabricadas tipo Rott, com fck de 35 MPa, britada em um britador de mandíbulas com abertura de 20 mm. Os agregados reciclados de concreto foram peneirados, utilizando-se no trabalho a fração passante na peneira de malha com

abertura de 19 mm e retida na de 4,8 mm. A dimensão máxima foi caracterizada em 12,5 mm e o módulo de finura em 7,25. A massa unitária do ARC é 1,13 g/cm³ e a massa específica é de 2,21 g/cm³. A curva granulométrica do ARC é apresentada junto à curva do AGN (figura 2).

Figura 2 - Distribuição granulométrica do AGN e do ARC.



MÉTODOS

Carbonatação do ARC - o lote de ARC empregado no estudo não apresentava carbonatação, portanto foi necessário carbonatar uma amostra, o que foi feito de forma acelerada em uma câmara de carbonatação. Os agregados foram saturados e depois secos em estufa até obter umidade aproximada de 70%, e então colocados na câmara de carbonatação, com concentração de 10% de CO₂ por um período de 7 dias. A carbonatação foi verificada através da aspersão de um indicador fenolftaleína sobre uma parcela da amostra reservada para controle.

Absorção de água do ARC - A absorção de água dos agregados reciclados, carbonatados e não carbonatados, foi caracterizada em balança hidrostática ao longo de 72 horas, e foi realizada em duas dimensões de amostras iguais a 12,5 e 25 mm.

Produção dos concretos - para a produção de concreto foi definido o traço 1:2,36:2,75, com relação água/cimento 0,56. Foram executadas três misturas, onde variou-se o tipo e teor de agregado: referência com 100% de agregado natural; com 50% de ARC; com 50% de ARC carbonatado. A substituição de agregado graúdo natural pelo ARC foi realizada em massa com compensação de volume (Equação A).

$$M_{ARC} = \frac{M_N}{\gamma_N} \times \gamma_{ARC} \quad (A)$$

Onde:

M_{ARC} = Massa do agregado reciclado;

M_{AN} = Massa do agregado natural;

γ_{NA} = Massa específica do agregado natural;

γ_{ARC} = Massa específica do agregado reciclado.

O abatimento utilizado foi de 100 ± 20 mm. Os ensaios de abatimento foram realizados em intervalos similares. A medição do 1º abatimento de cada um dos três concretos, por exemplo, foi realizado aos 7 minutos após o início da mistura, já o abatimento 2º foi medido aos 11 minutos após o início da mistura.

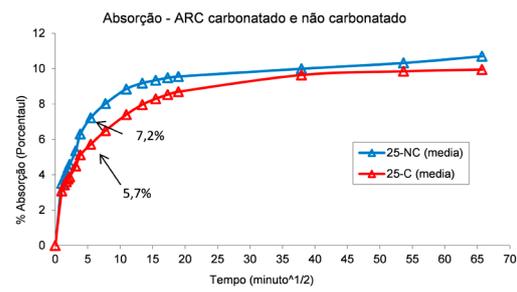
Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de cada mistura para os ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados, identificados e armazenados na em câmara úmida com 21±2°C e umidade relativa do ar de aproximadamente de 95%, até a idade de ensaio.

RESULTADOS

ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS RECICLADOS.

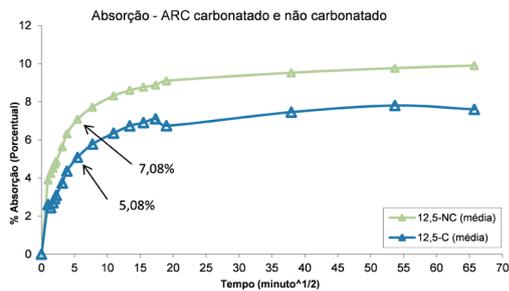
As curvas de absorção de água dos agregados reciclados carbonatados e não carbonatados estão apresentadas na Figura 3 e na Figura 4.

Figura 3 - Curva de absorção de ARC 25 mm não carbonatado e carbonatado.



A figura 3 mostra que há uma diferença na absorção de água em relação aos dois tipos de agregados. Observando que a escala do eixo x do gráfico da Figura 3 está apresentada como raiz quadrada do tempo, aos 30 minutos a taxa de absorção é de 7,2% para ARC não carbonatado e 5,7% para ARC carbonatado, o que corresponde a uma diferença de 20,8% de absorção entre os dois tipos de ARC.

Figura 1 - Curva de absorção de ARC 12,5mm não carbonatado e carbonatado



No gráfico da figura 4, observa-se que para os agregados com 12,5 mm apresentaram uma absorção de 7,08% e 5,0%, respectivamente para ARC não carbonatado e carbonatado, representando uma diferença de 28%. A tabela 2 apresenta a ANOVA da influência da carbonatação e do tamanho do agregado na absorção de água. Tabela 2- ANOVA da influência da carbonatação e da dimensão do ARC na absorção.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Carbonatação	3,0625	1	3,0625	49	0,090334471	161,4476
Dimensão	0,1369	1	0,1369	2,1904	0,378288193	161,4476
Erro	0,0625	1	0,0625			
Total	3,2619	3				

Onde: SQ – Soma Quadrada; gl– grau de liberdade; MQ – média quadrada;

Observa-se que estatisticamente não há diferenças significativas entre o efeito do ARC carbonatado e não carbonatado na absorção de água, para um nível significância de 95%, assim como para a dimensão do agregado.

A tabela 3 apresenta a análise da influência da dimensão do agregado na carbonatação do ARC.

Tabela 3 - ANOVA da influência da dimensão do ARC na carbonatação.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Dimensão do ARC	0,618462	1	0,618462	23,92919	0,008092	7,708647
Erro	0,103382	4	0,025845			
Total	0,721844	5				

Onde: SQ – Soma Quadrada; gl– grau de liberdade; MQ – média quadrada;

Pela análise de variância ANOVA (tabela 3) foi verificado que há interferência da dimensão do ARC na absorção de ARC carbonatado e não carbonatado, uma vez que o valor de “p” é menor que 5%, para um nível de confiança de 95%. Isso se deve ao fato que para os agregados de 12,5 mm houve carbonatação completa do grão, enquanto que os agregados de maior dimensão não foram completamente carbonatados no período de exposição. Os agregados de maior dimensão além de terem maior espessura de material sujeito à carbonatação, também são prejudicados pela própria espessura de carbonatação, que dificulta a entrada do gás carbônico no interior do grão. Desta forma o centro do agregado ficou com certo volume “não carbonatado”, conseqüentemente com mais vazios disponíveis para o preenchimento de água.

CONSISTÊNCIA.

Os resultados adquiridos a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone seguem descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do Abatimento de Tronco de Cone

Concreto	Abatimento – medida	Abatimento (mm)
Referência	1 ^a	115
ARC Não carbonatado	1 ^a	65
	2 ^a	50
ARC carbonatado	1 ^a	60
	2 ^a	55

Analisando os dados da tabela 4, percebe-se que os concretos com ARC apresentaram uma perda de abatimento de 50% em relação ao concreto referência. Este comportamento já era esperado. No entanto, esperava-se que o concreto com ARC não carbonatado apresentasse um abatimento menor do que aquele com ARC carbonatado, uma vez que o primeiro possui agregado que absorve maior quantidade de água.

Foi registrado, tanto na primeira quanto na segunda medida, o mesmo nível de abatimento para ambos concretos com ARC. A variação observada entre a primeira e a segunda medida pode ser considerada inerente ao próprio método de medida.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.

Para o ensaio de resistência à compressão, espera-se obter como resultado resistência maior para o traço de referência, em relação aos com

ARC. Os resultados encontrados para 7 dias e 28 dias, estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos concretos estudados.

Concreto	$f_{c,7 \text{ dias}}$ (MPa) média	Desvio Pa- drão (MPa)	CV (%)	$f_{c,28 \text{ dias}}$ (MPa) média	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
Ref	21,2	0,52	0,0028	28,9	2,37	0,0564
ARC-NC	25,2	0,65	0,0042	33,5	3,19	0,1017
ARC-C	23,4	0,49	0,0024	30,4	1,81	0,0329

A tabela 6 e a tabela 7 apresentam a análise de variância do efeito do ARC na resistência à compressão aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 6 – ANOVA da influência do agregado na resistência à compressão aos 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Agregado	743,707	1	743,707	296,691	0,00007	7,709
Erro	10,0267	4	2,5067			
Total	753,733	5				

Onde: SQ – Soma Quadrada; gl– grau de liberdade; MQ – média quadrada;

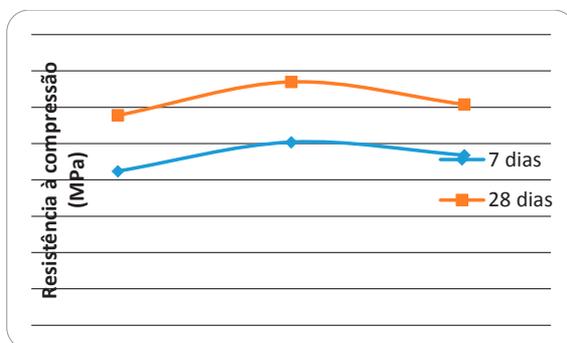
Tabela 7 – ANOVA da influência do agregado na resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Agregado	1344,007	1	1344,007	413,3285	0,00003	7,708647
Erro	13,00667	4	3,251667			
Total	1357,013	5				

Onde: SQ – Soma Quadrada; gl– grau de liberdade; MQ – média quadrada;

Com o valor “p” menor que 5% (tabela 7), a Análise de Variância indicou um efeito significativo do ARC na resistência à compressão nas idades estudadas. A figura 5 apresenta as médias de resistência para 7 e 28 dias.

Figura 5 – Resistência à compressão dos agregados estudados.



Os concretos com ARC retornaram, em ambas as idades, resultados de resistência à compressão superiores ao resultado de resistência do concreto de referência. Estas diferenças represen-

tam um aumento, em relação ao concreto referência, de 4 e 2,2 MPa aos 7 dias, respectivamente para o concreto com ARC e para o concreto com ARC carbonatado, o que representa aumentos de 19 e 10%. Já aos 28 dias o concretos com ARC apresentou um aumento de 4, 6 MPa, em relação ao concreto referência, o que representa um aumento de 16%. O concreto com ARC carbonatado teve uma resistência apenas 1,5 MPa maior do que o concreto referência aos 28 dias, o que significa um incremento de 5% na resistência.

Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o concreto referência apresentou resistência à compressão, aos 28 dias, de 28,9 MPa com a mesma relação água/cimento e mesmo teor de argamassa empregados nos concretos com ARC, que substituíram 50% do agregado natural. O $f_{c,k}$ do resíduo de concreto, que originou o ARC, é 35 MPa, e possivelmente a resistência aos 28 dias deste concreto já era maior do que 35 MPa. Além disto, o ARC ao ser empregado neste estudo já possuía mais de um ano e provavelmente a sua

resistência era ainda maior do que aos 28 dias. Logo, ao inserir o ARC em concreto com matriz de menor resistência pode resultar um novo concreto de resistência mais elevada do que o concreto de referência.

CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou, de forma exploratória, o efeito da carbonatação do agregado reciclado do concreto na absorção de água, na consistência e na resistência à compressão. A partir da análise dos resultados pode-se afirmar, para as condições experimentais deste estudo, que:

- ♦ a carbonatação do agregado reciclado de concreto reduziu, em média, a absorção de água de 7,14% para 5,35%, representando uma diferença absoluta de 1,79% ou relativa de 25%. No entanto, a análise de variância indicou que estatisticamente esta diferença não é significativa;
- ♦ a consistência do concreto com ARC carbonatado variou o abatimento de tronco-cone de 50 a 65 mm e do concreto não carbonatado de 55 a 60 mm, permanecendo em patamares de consistência semelhantes. No entanto, estes abatimentos indicam uma perda média de abatimento 50% em relação ao concreto de referência;
- ♦ a resistência à compressão dos concretos com ARC foram, em média e considerando ambas as idades de estudo, 13% maior do que a resistência à compressão do concreto estudado.

Num contexto geral, a carbonatação do ARC não levou a diferenças significativas no comportamento do concreto, para as propriedades estudadas, em relação ARC não carbonatado. No entanto, o emprego de ARC carbonatado pode contribuir para o sequestro de carbono liberado durante a produção do cimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS pelo financiamento da pesquisa e pela concessão de bolsa de iniciação tecnológica e à Unisinos pela concessão de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- 1 MEHTA, P. K, MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2008. São Paulo: IBRACON, 1ª Edição, p. 3-20.
- 2 WERLE, A.P., TROIAN, A., KAZMIERCZAK, C.S., KULAKOWSKI, M.P. Carbonation in concrete with coarse recycled concrete aggregates. In: Conference Proceedings of 12th International Conference on DBMC, 4., 2011, Porto. *Proceedings...* Porto: FEUP Edições, 2011, p. 1677-1684.
- 3 LIMBACHIYA, M.; MEDDASH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 439-449, 2012.
- 4 BELIN, P., HABERT, G., THIÉRY M., ROUSSEL N. *Improvement of recycled concrete aggregates properties by carbonation*. 2012. Gothenburg, SW. In: WASCON 2012 Conference *Proceeding*.
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12821: Preparação do Concreto em laboratório – Procedimento - Referências – Elaboração 2009*.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Referências – Elaboração 1998*.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos cilíndricos - Referências – Elaboração 2007*.

BEHAVIOR OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE CARBONATED

ABSTRACT

In the last years several researches of concretes with replacement of conventional aggregates by recycled aggregates from waste concrete (ARC) has been done. The higher porosity of ARC and its higher demand for water result in an increase on the new concretes' water/binder ratio. The ARC exposed to carbonation effect undergoes a change in its microstructure, which may reduce its porosity. This study aims to investigate the behavior of concrete with carbonated ARC and non carbonated, in fresh and hardened state. Absorption tests were conducted with the recycled aggregates. It was measured the concrete slump and the compressive strength at 7 days and 28 days. The carbonated ARC showed lower water absorption than non carbonated ARC. Tests of compressive strength at 7 and 28 days did not allow observe significant differences between both concrete.

Keywords: recycled concrete aggregate, porosity, carbonation.