



RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETOS

Aline Troian (1); Ana Paula Werle (2); Marlova Piva Kulakowski (3); Cláudio de Souza Kazmierczack(4)

(1) Arq., Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, Brasil, e-mail: aline.troian@gmail.com

(2) Arq., Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, Brasil, e-mail: anha_paula@gmail.com

(3) Dra., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, Brasil,
e-mail: marlovak@unisinos.br

(4) Dr., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, Brasil, e-mail: claudiok@unisinos.br

RESUMO

O emprego de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma prática que começa a tomar importância, tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade em geral. Tem sido consenso, em muitos estudos, que o agregado reciclado de concreto (ARC) é o mais indicado para uso em concreto estrutural e em concreto pré-fabricado. Por outro lado, nas últimas décadas a resistência à compressão das estruturas vem aumentando. Neste sentido, com a renovação e demolição de algumas estruturas, podem ser gerados vários tipos de agregados reciclados de concreto, com diferentes resistências e porosidades. Tanto a resistência quanto a porosidade do concreto que compõe o resíduo podem influenciar as propriedades do novo concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A maior porosidade do agregado reciclado influencia na sua absorção, bem como na demanda de água para manter o abatimento de tronco cone. Geralmente, é indicada a adoção da pré-molhagem dos agregados para compensar esta absorção, não havendo, porém, um consenso quanto ao teor de água de pré-molhagem que deve ser utilizado. Tanto a porosidade do agregado reciclado de concreto (ARC) quanto a maior demanda de água podem influenciar na durabilidade dos concretos. O objetivo deste trabalho é avaliar a penetração de cloretos em concretos compostos com ARC. O concreto reciclado foi composto em laboratório, variando-se a relação água/cimento, o que resultou resistências de 18, 37 e 50 MPa. Foram estudados teores de substituição de agregado natural por ARC de 0 a 100%. O teor de pré-molhagem também variou de 0 a 100% em relação à absorção total de cada um dos agregados. Empregou-se o método de penetração acelerada de cloretos conforme ASTM C-1202. Os resultados foram analisados por regressão múltipla e indicam que as variáveis estudadas e algumas interações influenciam o comportamento do concreto frente à penetração de cloretos.

Palavras-chave: agregados reciclados de concreto; íons cloreto, durabilidade, reciclagem.

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual pode-se verificar um forte apelo ao desenvolvimento sustentável e à necessidade de uma nova postura da sociedade em relação ao meio-ambiente. Grande parte das pesquisas na Construção Civil é voltada à busca da sustentabilidade do setor, merecendo destaque as que enfocam as reduções de desperdícios de materiais, a melhoria contínua da mão-de-obra, a qualidade dos materiais e produtos finais, o desempenho ambiental, a reciclagem de resíduos e a durabilidade dos materiais e sistemas construtivos.

De acordo com a Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério das Cidades (2010) os resíduos de construção e demolição no Brasil correspondem, em média, à 61% dos resíduos sólidos urbanos. Conforme o *Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2007* (SNIS, 2009), os resíduos de construção e demolição (RCD), coletados apenas pelas prefeituras dos municípios que compuseram a amostra, equivalem a 36,5% do total de resíduos sólidos domiciliares e públicos gerados. De acordo com o levantamento feito, este percentual corresponde a 129 Kg/habitante/ano. Contudo, conforme apontado no documento, este valor deve ser maior, uma vez que outros agentes de coleta fazem a disposição ou encaminham para a reciclagem destes resíduos.

O consumo de insumos na construção civil é elevado, levando à extração de grandes somas de recursos naturais, o que pode ser exemplificado pela produção de agregados destinados ao setor no Brasil, que, no ano de 2007, foi de $4,65 \times 10^9$ kg (LA SERNA; REZENDE, 2009). Outro dado que expressa os volumes de matérias primas empregados na construção civil é o consumo aproximado de 51 milhões de toneladas de cimento em 2008, com patamares de consumo similares em 2009 (SNIC, 2010). A busca de materiais alternativos aos tradicionalmente empregados na produção de bens de consumo na Indústria da Construção vem recebendo atenção especial, tanto por parte do setor produtivo quanto por parte da academia.

O emprego de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma prática que começa a tomar importância, pois pode trazer benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade em geral. Tem sido consenso em muitos estudos que o concreto é o RCD mais indicado para ser reciclado como agregado na produção de concreto estrutural e de concreto pré-fabricado (ÂNGULO et al., 2006). Nas últimas décadas, a resistência à compressão das estruturas vem aumentando o que, com a renovação e demolição de algumas estruturas, pode gerar vários tipos de agregados reciclados de concreto (ARC), com diferentes resistências, porosidades e absorção de água. Sendo a absorção de água do ARC maior do que a de um agregado convencional há a necessidade de compensar a eventual água absorvida da água de amassamento do concreto novo pelo material reciclado.

1.1 Resistência dos agregados reciclados

Villagrán-Ziccardi et al. (2008) analisaram a penetração de íons cloreto e cloretos combinados em concretos produzidos com agregado reciclado a partir de concretos. Foram empregados teores de substituição do agregado natural pelo reciclado de 50 e 75%, relações a/c que variaram de 0,35 à 0,60, e dois tipos de cimentos. Os concretos residuais empregados para a obtenção dos agregados reciclados possuíam diferentes resistências e não foram segregados em função da resistência, sendo que a absorção do ARC era de 4,6% contra 0,3% do agregado granítico. O abatimento de tronco cone das misturas variou de 120 a 60 mm. Os autores, nestas condições de estudo, concluíram que a relação a/c exerce maior influência na taxa de penetração de íons cloreto do que a porosidade do ARC.

1.2 Absorção de água dos agregados reciclados

Considerando que os agregados reciclados são compostos por materiais porosos do que os agregados convencionais, eles apresentam taxas de absorção muito elevadas. No estudo realizado por Bazuco (1999) com agregados reciclados de concreto, a taxa de absorção média, medida em 24 horas, de 8,45% e uma grande parcela de água é absorvida até os primeiros 30 minutos do contato do material com a água. No trabalho de Leite (2001), a absorção dos agregados de RCD misto foi caracterizada em 8,60% para o agregado miúdo e 4,95% para o agregado graúdo. No entanto, na pesquisa de Vieira (2003), também conduzida com agregado reciclado misto, as taxas de absorção obtidas foram mais elevadas, correspondendo a 11,08% para o agregado miúdo e 6,04% para o agregado graúdo. Buttler

(2003), trabalhando com agregados reciclados de concreto, de diferentes resistências em função do grau de hidratação, obteve absorções de 5,48 a 6,25%. Nunes (2007) verificou que o agregado graúdo reciclado misto apresentou uma absorção média de água equivalente a 13,09% em um período de imersão 24 h, apresentado nos primeiros minutos 80% da absorção total registrada. A absorção de água dos agregados reciclados exerce influência na relação a/c final das misturas e na trabalhabilidade do material deixando o concreto muito seco (LEITE, 2001). Segundo Lima (1999) é fundamental avaliar esta característica, pois a maior absorção dos agregados reciclados pode dificultar a produção de argamassas e concretos e pode interferir de forma negativa na durabilidade (LIMA, 1999). Sendo assim, é muito importante o estudo da absorção e da água de compensação ou pré-molhagem do agregado reciclado, a fim de evitar maiores interferências no concreto.

1.3 Teor de pré-molhagem dos agregados reciclados

Segundo Vieira (2003), é preciso ser discutido a alta taxa de absorção de água dos agregados reciclados. O concreto com este agregado mais poroso irá demandar mais água para ter a mesma trabalhabilidade que concretos com agregados convencionais. A partir deste fator, muitos autores realizam misturas de concretos variando o consumo de água para que o abatimento e a trabalhabilidade sejam satisfeitos. No entanto a relação a/c é alterada influenciando a resistência destes concretos, o que não torna possível a comparação direta entre concretos convencionais e concretos com agregados reciclados. De fato, o que pode ser observado é que o desempenho dos concretos com agregados reciclados, no que diz respeito à trabalhabilidade, é considerado insatisfatório devido à perda de abatimento sofrida por estes concretos, principalmente com o aumento do percentual de agregado graúdo reciclado nas misturas. Assim, inúmeras pesquisas enfatizam a pré-molhagem como um aspecto essencial a ser considerado no emprego de agregados reciclados.

Para agregados que são previamente saturados antes da mistura, ocorrerá mobilização de água na pasta fresca, pois a água absorvida pelo agregado pode ser considerada água livre e, portanto, quando mobilizada para a mistura fresca acarretará um aumento da relação água/cimento na zona de transição, fato este que aumentará o índice de vazios e resultará na redução da resistência (BUTTLER, 2003). Em contraposição, Cabral et al. (2007) afirmam que a água de pré-molhagem absorvida primeiramente pelos agregados reciclados, posteriormente torna-se disponível dentro da mistura, podendo hidratar as partículas de cimento não-hidratadas além de ajudar no processo de cura do concreto. A presença de água no agregado propicia também a formação de uma boa zona de transição entre a nova pasta e o agregado reciclado. Bazuco (1999) afirma que a utilização de agregados graúdos reciclados secos não interfere sensivelmente nas propriedades dos concretos, em relação aos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados saturados. Porém Buttler (2003) considera que os agregados reciclados não saturados, incorporados na mistura ao mesmo tempo em que os demais materiais, irão absorver uma grande quantidade de água e partículas de cimento, acarretando em uma densificação do agregado e em um enfraquecimento da zona de transição, provocando uma diminuição de resistência.

1.4 Teor de agregados reciclados

Segundo Eguchi et. al (2007), teores elevados de agregado graúdo reciclado na mistura do concreto diminuem a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, e aumentam a retração por secagem. A qualidade do concreto deve ser assegurada a partir do ajuste de um teor ótimo de substituição de agregado natural por reciclado, tornando a trabalhabilidade e o desempenho estrutural compatível com desempenho apresentado pelo concreto convencional. Poon e Kou (2006), estudando a resistência à compressão, a distribuição de poros e a penetração de íons cloreto em concretos com agregados reciclados de concreto, concluíram que a o aumento do teor de ARC diminui a resistência do concreto, mas que esta diminuição pode ser compensada com a diminuição da relação a/c da mistura. A porosidade total e o diâmetro médio dos poros do concreto aumentam com o aumento do teor de ARC. Contudo o aumento do teor de ARC associado ao emprego de baixas relações a/c e de 25% de cinza volante diminui a penetração de íons cloreto, reduzindo também o diâmetro dos poros e a porosidade.

Desta forma, fazem-se necessários estudos que indiquem qual a influência da resistência do concreto reciclado no comportamento de agregados reciclados de concreto incorporados em novas matrizes de concreto, bem como a influência do teor de substituição de da realização de uma pré-molhagem para compensar a absorção de água do ARC.

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar a influência do tipo e do teor de ARC na penetração de íons cloreto em concretos compostos com ARC, bem como a influência da taxa de pré-molhagem empregada para compensar a absorção de água do resíduo.

3 METODOLOGIA

3.1 Variáveis

Tendo em vista o objetivo do presente trabalho, as variáveis de resposta a serem analisadas são “Carga total passante”, que retrata a resistência do concreto à penetração acelerada de cloretos; e “Resistência à compressão”. As variáveis de controle são “Teor de agregado reciclado de concreto”, com níveis de 0, 25, 50, 75 e 100%; “Resistência à compressão dos agregados reciclados”, com níveis fixos de 18, 37 e 50 MPa; “Teor de pré-molhagem”, com níveis fixos de 0, 25, 50, 75 e 100% da absorção total dos ARC. As variáveis de controle foram testadas por meio de um projeto de experimentos do tipo fatorial fracionado e a combinação de variáveis pode ser observada nas tabelas de apresentação de resultados (Tabela 2 e Tabela 3).

3.2 Materiais

O cimento utilizado no programa experimental foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial CP-V- ARI, obtido de um único lote de produção, com massa específica de 3,12 g/cm³. Como agregado miúdo utilizou-se areia de origem quartzosa, proveniente da região de Quatro Colônias, Rio Grande do Sul, com módulo de finura igual a 2,73; dimensão máxima característica de 4,8 mm; massa específica de 2,49 g/cm³; e massa unitária de 1,61 g/cm³. Como agregado graúdo utilizou-se brita de origem basáltica, classificado na faixa granulométrica compreendida entre 12,5 e 25 mm; com módulo de finura igual a 6,69; dimensão máxima característica de 19 mm; massa específica de 2,75 g/cm³; e massa unitária de 1,49 g/cm³. As demais características dos materiais podem ser conferidas em Troian (2010).

3.3 Agregados reciclados de concreto

O concreto reciclado como ARC foi produzido em laboratório, a fim de se obter três níveis diferentes de resistência à compressão. Para a confecção destes concretos foram utilizados os mesmos materiais do concreto da nova matriz onde foram inseridos os ARC. Para a dosagem dos concretos reciclados foi adotado o método de Helene e Terzian (1992), ajustando-se um teor de argamassa α igual a 49%. As características físicas dos concretos e dos ARC são apresentadas na Tabela 1, cuja absorção de água foi medida conforme Werle et al. (2010).

Tabela 1 - Caracterização física dos agregados reciclados de concreto.

Relação a/c	fc ¹ 28 dias (MPa)	Dim. Máx. Característica	Módulo de finura	M. específica (g/cm ³) ²	M. unitária (g/cm ³) ³	Absorção total (%)
0,85	18 MPa	25	7,68	2,50	1,21	8,49
0,56	37 MPa	25	7,61	2,47	1,18	6,07
0,43	50 MPa	25	7,70	2,49	1,21	5,24

¹ANM NM 101:1996; ²ANM NM 52:2002 / ANM NM 53:2002, ³ANM NM 45:1995.

3.4 Produção dos concretos com ARC

O concreto empregado como referência, e no qual foram realizadas as substituições parciais e totais de agregado natural por ARC, tem como característica uma trabalhabilidade pré-estabelecida de 100 ±20 mm, com um teor de argamassa de 53%, resultando em um traço de cimento:agregado miúdo:agregado graúdo igual a 1:3,13:3,67, relação a/c igual a 0,64, e resistência aos 28 dias de 32,4 MPa.

Este trabalho está inserido dentro de um projeto maior, envolvendo as pesquisas de Grub (2010), Troian (2010) e Werle (2010). As decisões tomadas no programa experimental de Grub (2010), que

analisou propriedades do concreto no estado fresco, influenciaram os demais programas experimentais do projeto. O abatimento de tronco cone foi definido em 100±20 mm e deveria ser garantido em todas as misturas. Ao inserir o ARC, com os diversos teores de pré-molhagem, foi necessário ajustar a água de amassamento, com aumentos ou reduções, de forma a garantir o abatimento estipulado. Este ajuste gerou uma matriz de concreto com a/c modificado em relação ao concreto de referência, obtendo-se valores diferentes de a/c para cada combinação de variáveis. O resultado foi uma nova variável independente que foi tratada por a/c final (a/c inicial + a/c de ajuste), com níveis aleatórios.

3.5 Métodos de ensaios

Os concretos estudados foram caracterizados quanto à resistência à compressão axial conforme ABNT NBR 5739:2003. Para o ensaio de penetração acelerada de íons cloreto utilizado o método baseado na ASTM C 1202-07 - Rapid Chloride Ions Penetration Test – RCPT. Adotou-se este método por se tratar de um teste muito utilizado no meio científico e por ser um método que oferece respostas em curto espaço de tempo (KULAKOWSKI, 1994; HOFFMANN, 2001; SIQUEIRA, 2008).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Resistência à compressão

Na Tabela 2 são apresentadas as médias dos resultados obtidos para resistência à compressão.

Tabela 2 – Características médias de resistência à compressão axial dos concretos estudados.

Tipo de ARC*	Teor de substituição (TAG)	Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18 MPa (a/c 0,85)	25%		33,3		27,2	
	50%	29,9		30,4		28,5
	75%		27,9		26,6	
	100%	26,8		25,5		25,6
37 MPa (a/c 0,56)	25%	29,5		35,4		32,7
	50%		31,6		33,7	
	75%	30,8		29,3		27,1
	100%		26,7		30,7	
50 MPa (a/c 0,43)	25%		32,7		25,8	
	50%	33,5		34,3		33,8
	75%		28,2		25,7	
	100%	31,1		32,6		28,8

*O valor da resistência à compressão axial do concreto de referência é de 32,4 MPa.

4.2 Penetração de íons cloreto

A carga total resultante para cada combinação de variáveis é apresentada na Tabela 3. O tratamento estatístico dos dados observados para a carga total passante em concretos foi realizado por meio de regressão múltipla linear. O modelo proposto para análise está apresentado na Equação 1.

$$Q = b_0 + b_1 \times \text{TAG} + b_2 \times \text{TPM} + b_3 \times \text{TAG}^2 + b_4 \times \text{TPM}^2 + b_5 \times \text{ACF}^2 + b_6 \times (\text{ABS} \times \text{TAG}) + b_7 \times (\text{TAG} \times \text{TPM}) + b_8 \times (\text{TAG} \times \text{ACF}) + b_9 \times (\text{TPM} \times \text{ACF}) \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Q = Carga total passante (Columbs); TAG = teor de substituição de agregado (%); TPM = teor de pré-molhagem(%); ACF = relação água cimento final; ABS = absorção do agregado (%).

Tabela 3 – Resultados das médias de carga total passante (Coulomb).

Tipo de ARC*	Teor de substituição (TAG)	Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18 MPa (a/c 0,85)	25%		4924		5110	
	50%	8607		5814		6222
	75%		7946		9542	
	100%	9430		9158		9963
37 MPa (a/c 0,56)	25%	4795		5414		8388
	50%		5541		5846	
	75%	5405		6601		7380
	100%		8043		8680	
50 MPa (a/c 0,43)	25%		4742		4806	
	50%	6237		5634		5749
	75%		6312		6820	
	100%	6847		6832		8142

* O valor da carga total passante do concreto de referência é de 4077 Coulombs.

A análise de variância (ANOVA) do modelo calculado é apresentada na Tabela 4 e os parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas (fatores) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Anova do modelo para a carga total passante.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	9	7,1532	7948	17,68	0,0000
Resíduos	21	9,44282	2,50	1,21	
Total Corrigido	30	8,09748	2,49	1,21	

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

O valor de 'p' menor que 0,01, apresentado na Tabela 4, indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação r^2 obtido de 0,8834 indica que o modelo explica 88,34% da variabilidade dos valores observados para carga total passante. Ressalta-se que a variabilidade do ensaio proposto pela ASTM C-1202-07 é alta. Pereira (2001), por exemplo, ao empregar este mesmo ensaio para análise de concretos com diferentes tipos de cimentos em diferentes condições de cura, obteve um coeficiente de determinação em torno de 76%. Por sua vez, ao estudar-se a penetração de íons cloreto em concretos compostos com agregados reciclados de concreto, soma-se à variabilidade do método do ensaio a variabilidade dos agregados reciclados. Desta forma, considera-se o coeficiente de determinação r^2 obtido nesta análise satisfatório.

Tabela 5 – Parâmetro das variáveis analisadas para a carga total passante.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	-1864,92	3514,57	-0,530626	0,6012
TAG	b1	291,143	92,0107	3,16423	0,0047
TPM	b2	-339,905	84,4363	-4,02558	0,0006
TAG ²	b3	0,602833	0,223394	2,69852	0,0135
TPM ²	b4	0,903205	0,213384	4,23277	0,0004
ACF ²	b5	14867,5	8232,41	1,80597	0,0853
ABS*TAG	b6	9,73207	1,46102	6,66117	0,0000
TAG*TPM	b7	0,837158	0,257582	-3,25007	0,0038
TAG*ACF	b8	-508,871	150,242	-3,38701	0,0028
TPM*ACF	b9	-460,893	110,221	4,18152	0,0004

TAG= teor de substituição de agregado; TPM=teor de pré-molhagem; ACF= relação a/c final; ABS=absorção do agregado.

Considerando-se as variáveis analisadas no modelo, e suas interações, os resultados da Tabela 6 indicam que o teor de substituição de agregado (TAG) e o teor de pré-molhagem (TPM) são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 99%, pois apresentaram valores de "p" menores que 0,01. A relação a/c final (ACF) apresenta efeito significativo na carga total passante, na forma de um termo quadrático, contudo a um nível de confiança de 90%, pois o valor de "p" para este fator é de 0,08.

Da mesma forma constatou-se que a interação da variável analisada ABS×TAG apresenta influência significativa na carga total passante. Este resultado indica que o tipo de agregado, nesta análise representada pela sua absorção (ABS) somente apresenta um efeito significativo sobre a variável estudada quando associado ao efeito do teor de substituição de agregado (TAG). As interações entre as variáveis analisadas TAG×ACF e TPM×ACF, também são fatores de controle que influenciam significativamente no comportamento da carga total passante, que retrata a resistência à penetração de íons cloreto, ao um nível de 99%, configurando um valor de "p" menor do que 0,01, ou seja, comprovou-se que a interação entre estas variáveis são significativas estatisticamente. A Equação 2 apresenta o modelo adotado para a carga total passante.

$$Q = -1864,92 + 291,143 \times \text{TAG} - 339,905 \times \text{TPM} + 0,602833 \times \text{TAG}^2 + 0,903205 \times \text{TPM}^2 + 14867,5 \times \text{ACF}^2 + 9,73207 \times (\text{ABS} \times \text{TAG}) - 0,837158 \times (\text{TAG} \times \text{TPM}) + 508,871 \times (\text{TAG} \times \text{ACF}) + 460,893 \times (\text{TPM} \times \text{ACF}) \quad \text{Equação 2}$$

Onde: QM = carga total passante (Coulombs); TAG = teor de substituição de agregado (%); TPM = teor de pré-molhagem (%); ACF = relação água cimento final; ABS = absorção do agregado (%)

Nos gráficos das Figuras 1, 2 e 3 são apresentadas as curvas de comportamento de carga total passante após 6 h de ensaio, para três níveis fixos de relação a/c final, elencados entre os menores e maiores valores de relação a/c final praticados no programa experimental.

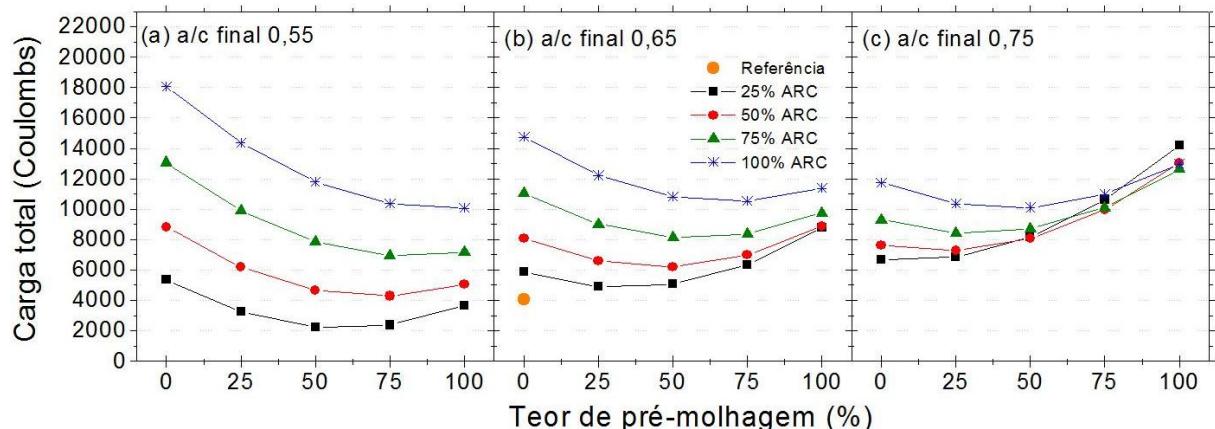


Figura 1 - Carga total passante para concretos com ARC 18 MPa.

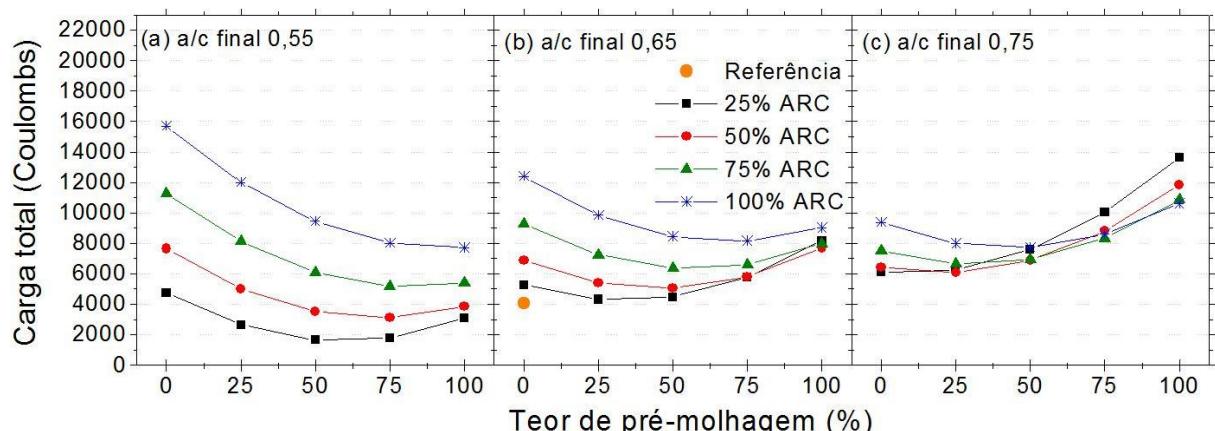


Figura 2 - Carga total passante para concretos com ARC 37 MPa.

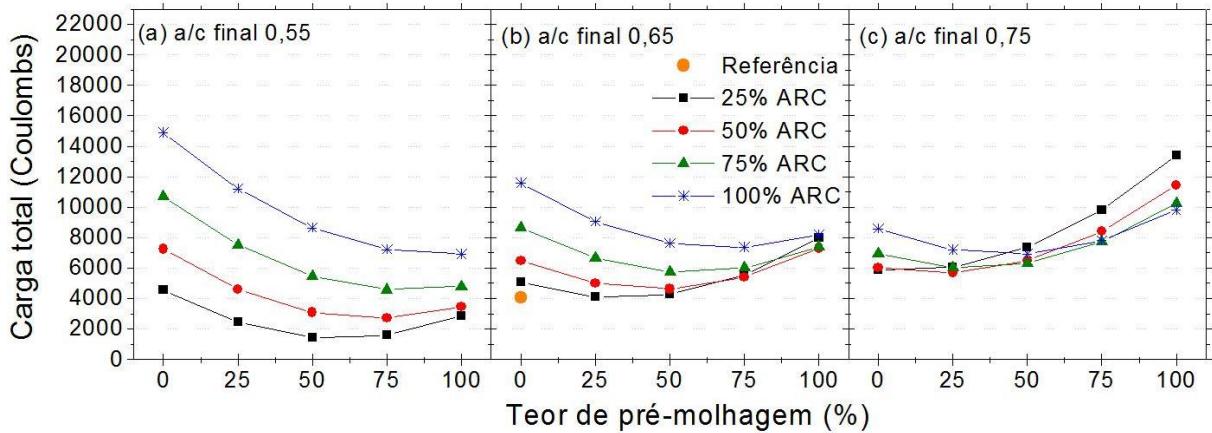


Figura 1 - Carga total passante para concretos com ARC 50 MPa.

Os concretos com ARC de 18 MPa, com valores pré-molhagem de até 50%, com teores de substituição (TAG) superior a 50%, apresentaram uma carga total passante maior quando as relações a/c são menores, conforme pode-se observar nas curvas dos modelos ajustados, apresentadas nos gráficos das Figuras 1(a) e 1(b). No entanto, para a relação a/c 0,75, quando o valor de pré-molhagem é superior ao teor de 50% os menores teores de substituição apresentam maior carga total passante (Figura 1(b)).

Os concretos com ARC de 37 MPa (Figura 2) e 50 MPa (Figura 3), apresentaram uma mesma tendência de comportamento, sendo que a carga total passante não apresenta diferenças significativas quando comparam-se os concretos com estes dois tipos de agregado. Contudo, em relação ao concreto com ARC 18 MPa, ambos apresentam uma diferença significativa.

Os resultados da carga total passante dos concretos produzidos com o ARC de 18 MPa, apresentaram um aumento médio de 90,15% quando comparados com os concretos de referência. Da mesma forma os concretos com ARC de 37 e 50 MPa apresentaram respectivamente um aumento médio de 62,11% e 52,37% em relação aos concretos de referência (Figura 4). Pode- se ainda dizer que independente da resistência do ARC, os concretos que possuem um teor de pré-molhagem superior à taxa de 50%, teores de substituição acima de 50% e relação a/c final mais elevada, apresentaram um valor maior de carga passante.

Outro aspecto importante a ser observado, é que quanto maior a relação a/c da matriz do concreto, maior é a carga passante, ou seja, menor é a resistência à penetração de íons cloreto, claramente evidenciado quando são comparadas entre si, para cada tipo de agregado, as curvas dos concretos com relação a/c 0,55, 0,65 e 0,75. Destaca-se também que é possível analisar os resultados para os traços produzidos com um a/c final de 0,65, salientando que esta relação é similar a relação a/c do concreto de referência, cujo valor foi de 0,64. O concreto de referência, cuja matriz é a mesma dos concretos com ARC, já é uma matriz com uma porosidade elevada, e este fato isoladamente já resulta em um concreto com uma alta penetrabilidade de cloretos, conforme classificação da norma ASTM C 1202-07. Desta forma, as médias dos resultados de carga total passante para os concretos com ARC os classificam como concretos com alta penetrabilidade de íons cloreto, e a carga total passante nos concretos com ARC foi maior que a do concreto de referência, para a relação a/c final 0,65, em todos os tipos de agregado, teor de substituição e teor de pré-molhagem.

Conforme a ASTM C 1202-07, os concretos com valores de carga total inferior a 2000 Coulombs apresentam baixa penetrabilidade de íons cloreto, e os concretos com valores de carga total entre 2000 e 4000 Coulombs apresentam moderada penetrabilidade de íons cloreto. As Figuras 2(a) e 3(a), correspondem aos gráficos com curvas de comportamento para concretos com relação a/c final 0,55, para os concretos com ARC 37 e 50 MPa respectivamente. As curvas que representam os concretos com um teor de 25% de substituição de ARC e percentuais entre 50 e 75% de pré-molhagem, apresentam uma baixa penetrabilidade de íons cloreto. Já para os concretos com ARC 18 MPa e

relação a/c final 0,55, os concretos com teor de 25% de ARC apresentam moderada penetrabilidade a íons cloreto.

Ao observar os gráficos com os resultados das cargas totais passantes, para os novos concretos com a/c final de 0,65, a tendência de comportamento até um percentual de 50% de TPM é invertido. A interação entre teor de pré-molhagem (TPM) e a/c final é observado na mudança na flexão das curvas, isto é, depois do teor de 50% a carga passante aumenta. Entretanto, ficou constatado que o tipo de agregado não é determinante, quando esse está inserido dentro de uma matriz com uma relação a/c maior.

Contatou-se que o resultado da carga total passante dos concretos com 50% de ARC 18 MPa, e com um percentual de 100% de pré-molhagem, é similar aos valores encontrados por Barata (1998) para os concretos de referência com um a/c de 0,64. Este autor em sua pesquisa enfocou a penetração acelerada de íons cloreto em concretos compostos por cimento Portland CP II F 32, empregando relações a/c entre, 0,39 e 0,64, adições de sílica ativa e metacaulim.

Gomes e Brito (2009), ao conduzirem um estudo experimental semelhante ao presente trabalho, evidenciaram que os concretos com ARC apresentaram uma penetração de íons cloreto ligeiramente superior, com diferenças máximas em torno de 6%, quando comparados com os concretos que continham agregado natural. Esta baixa redução da resistência à compressão observada pelos referidos autores pode ser atribuída à baixa relação a/c da matriz de concreto onde foram incorporados os ARC, com valor de 0,43, enquanto que o presente trabalho empregou uma relação a/c de 0,64, o que pode justificar as diferenças mais elevadas em relação ao concreto de referência.

Poon e Kou (2006) mostraram em sua pesquisa, que com uma redução da relação a/c de 0,55 para 0,45, obtiveram um aumento significativo na resistência à penetração de íons cloreto, uma vez que o volume de poros diminui e assim torna o concreto mais impermeável e em conformidade a resistência à penetração de íons cloreto aumenta. Os resultados apresentaram uma diminuição da resistência à penetração de íons cloreto, com o aumento do agregado reciclado. No entanto segundo os autores essa compensação na redução, poderia ser feita através da utilização de um teor de adição entre 25 a 35% de material pozolânico. Desta forma, fica evidenciado que a relação a/c final da matriz de cimento exerce grande influência no comportamento da propriedade em questão e se o presente programa experimental tivesse contemplado outras matrizes de concreto, possivelmente ter-se-iam resultados mais satisfatórios.

De maneira geral, a análise estatística dos resultados indica que, em média, quanto maior o teor de substituição de ARC e o percentual de pré-molhagem, maior é a carga total passante. A porosidade do agregado, traduzida pela resistência à compressão do ARC, apresenta um limite crítico para a penetração de íons cloreto, que deve estar situado, para as condições experimentais empregadas, entre 18 e 37 MPa, pois é neste intervalo que pode-se observar uma inflexão no comportamento do concreto com ARC. Nos concretos com ARC de maior resistência (37 e 50 MPa) não há diferença expressiva nas cargas totais passantes.

5 CONCLUSÕES

A resistência à penetração de íons cloreto sofre influência das variáveis analisadas. De maneira geral, pode-se dizer que os concretos produzidos apresentaram um decréscimo na resistência à penetração de íons cloreto decorrente da porosidade do ARC, ou seja, quanto menor a resistência do ARC, neste caso 18 MPa, maior é a carga passante, e consequentemente menor é a resistência à penetração de íons cloreto. Contudo, observando os agregados com maior resistência, neste caso acima de 37 MPa, os valores não apresentam diferença significativa entre si. Outro aspecto observado foi quanto à relação a/c final da matriz do concreto, observando-se que quanto maior a relação a/c maior é a carga passante, independente do tipo de ARC, pois quando é inserido o agregado em uma matriz que já apresenta alta porosidade, a resistência do ARC parece não influenciar nos resultados.

A partir da análise de regressão dos resultados obtidos, que o teor de substituição de agregados apresenta um efeito isolado significativo no comportamento dos concretos. Contudo, esta variável em interação com o teor de pré-molhagem também apresenta um efeito significativo, o que se traduz pelo

fato de que até uma pré-molhagem de 50% quanto maior o percentual de substituição (TAG) maior será a carga total passante, assim comprovando a influência do teor de substituição. No entanto quando o valor de pré-molhagem passa de 50% este comportamento parece não ser significativo, ou seja, o teor de substituição representa não ter uma forte influência. A variável ‘teor de substituição de agregado’ também apresenta efeito significativo quando em interação com a relação água/cimento final da matriz.

Pode-se inferir ainda que o percentual de pré-molhagem (TPM) , quando passa do valor de 50% e apresenta um valor maior no a/c final, demonstrou aumentar a carga total passante dos concretos. Outro aspecto que pode ser salientado é a interação da variável TPM com a variável TAG. Os traços que apresentam menores percentuais de pré-molhagem e maiores teores de substituição de ARC, consequentemente apresentaram maiores valores na carga total passante.

6 REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1202-07**: Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 2007.
- ANGULO, S. C.; JOHN, V.M.; ULSEN, C.; KAHN, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 1.613-1.624. .
- BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. 1999. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1999.
- BUTTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto- influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 2003. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2003.
- CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. 2007. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos- Doutor em ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, 2007.
- EGUCHI, K.; TERANISHI, K; NAKAGOME, A.; KISHIMOTO, H.; SHINOZAKI, K.; NARIKAWA, M. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. july, de 2007. **Construction and Building Materials**, Vol 21, n.7,p.1542-1551, july 2007.
- GOMES, M; DE BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. **Materials Structures**, v.42, p.663-675, 2009.
- GRUB, M. **Estudo das propriedades no estado fresco e mecânicas de concretos com agregado reciclado de concreto**. 2010. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010 – Em desenvolvimento
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992,349 p.
- HOFFMANN, A. T. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Porto Alegre, 2001. 150p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com Adição de Microssílica para Reparos Estruturais: Estudo**

da Penetração de Cloretos. 1994. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, RS, 1994.

LA SERNA, H.A.; REZENDE, M.M.; Agregados para construção civil. In: RODRIGUES, A.F.S.(coord). **Economia Mineral do Brasil.** 2009. Brasília: DNPM, 2009. 764p. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=1461>> Acesso em: 05 maio 2010.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 266f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

LIMA, J. A. R. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. 1999. 246f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós- graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 1999.

NUNES, W. C. **Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido.** 2007. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós- graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2007.

PEREIRA, V. G. A. Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, relação água/cimento, temperatura e tempo de cura. 2001, 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS, 2001.

POON, C. S.; KOU, S. C. Compressive strength, pore size distribution and chloride ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-fly ash. **Journal of Wuhan University of Technology**, Vol 21, n.4, 2006.

SECRETARIA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2007 Parte 1.** Brasília: MCIDADES – SNSA, 2009. 262 p.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Panorama dos resíduos da construção no Brasil.** Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/secretarias-nacionais/saneamento-ambiental/biblioteca/residuos-de-construcao-e-demolicao/panorama-residuos-da-construcao/Panorama%20dos%20residuos%20da%20construcao%20no%20Brasil.doc/view>>. Acesso em: 05 maio 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Press Kit SNIC 2010.** São Paulo: SNIC, 2010. 25p. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em: 05 maio 2010.

SIQUEIRA, H.C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente.** 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frenta à penetração de íons cloreto.** 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

VIEIRA, G. L. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre-RS, 2003. 151f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.

VILLAGRÁN-ZICCARDI, Y.A; ZEGA, C.J ; DI MAIO, A. A. Chloride penetration and binding in recycled concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v 20, n.6, pg. 449-455, june 2008.

WERLE, A.P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação.** 2010. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WERLE, A.P.; TROIAN, A.; ALCÂNTARA, J.; KULAKOWSKI, M.P.; KAZMIERCZAK, C.S. Análise de metodologias utilizadas para a determinação da absorção de água de agregados reciclados. In.: ENTAC 2010, no prelo.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FINEP e CAPES.