

## ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM MISTURAS DE ARGAMASSA

Felipe de Campos Loch <sup>1</sup>; Patrick Sequeira Godoi <sup>2</sup>; Leonardo Hideki Higa <sup>2</sup>;  
Murilo Teixeira Costa <sup>2</sup>; Abdu Alrahman Mohieddine <sup>2</sup>; Daniel Santana Santos <sup>2</sup>.

**Resumo** – Os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados em larga escala em nossa sociedade e, portanto, são uma mercadoria de grande disponibilidade. A capacidade de utilizá-lo pode garantir a preservação de matérias-primas e melhorará o impacto ambiental em termos de paisagismo geológico, aumentando a sustentabilidade econômica e social. Este trabalho apresenta os resultados de uma investigação do efeito da substituição parcial de agregado miúdo por resíduos de construção e demolição (RCV) nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas para a construção civil. O estudo foi realizado utilizando a técnica de planejamento fatorial fracionado 3 3-1 para o projeto e análise dos experimentos, para cada fator foram selecionados 3 níveis de resíduos (RCD: 0; 10; 20% em massa), teor água-cimento (W/C: 0,35; 0,45; 0,55 em massa), e relação agregado-cimento (A/C: 2,166; 3,033; 3,899 em massa). A resistência à compressão foi avaliada, após 7 dias de cura, com corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Propriedades físicas de trabalhabilidade e absorção de água também foram avaliadas nas argamassas fabricadas. Com os resultados da caracterização, análises estatísticas possibilitaram calcular modelos de regressão relacionando cada propriedade com os teores RCD, W/C e A/C. Foi possível avaliar a quantidade máxima de RCV nas argamassas, para determinadas características de propriedades físicas e mecânicas. Os resultados mostraram um acréscimo de resistência para as misturas com nível médio de RCD = 10%. Foi possível produzir argamassas com resistência à compressão aos 7 dias entre 15 MPa a 30 MPa, substituindo até 10 % em massa de agregado miúdo por resíduos de construção e demolição.

**Abstract** – Construction and demolition waste (CDW) is generated on a large scale in our society and, therefore, is a widely available commodity. The ability to use it can guarantee the preservation of raw materials and will improve the environmental impact in terms of geological landscaping, increasing economic and social sustainability. This work presents the results of an investigation of the effect of partial replacement of fine aggregate by construction and demolition waste (CDW) on the physical and mechanical properties of mortars for civil construction. The study was carried out using the fractional factorial design technique 3 3-1 for the design and analysis of the experiments, for each factor 3 levels of residues were selected (CDW: 0; 10; 20% by mass), water-cement content (W/C: 0.35; 0.45; 0.55 by mass), and aggregate-cement ratio (A/C: 2.166; 3.033; 3.899 by mass). The compressive strength was evaluated, after 7 days of curing, with cylindrical specimens with 50 mm in diameter and 100 mm in height. Physical properties of workability and water absorption were also evaluated. With the results of the characterization, statistical analyzes made it possible to calculate regression models relating each property to the levels CDW, W/C and A/C. It was possible to evaluate the maximum amount of CDW in mortars, for certain characteristics of physical and mechanical properties. The results showed an increase in resistance for mixtures with an average level of CDW = 10%. It was possible to produce mortars with compressive strength at 7 days between 15 MPa to 30 MPa, replacing up to 10% by mass of fine aggregate with construction and demolition waste.

**Palavras-Chave** – argamassa, resíduos de construção e demolição, planejamento fatorial.

<sup>1</sup> Eng., DSc, Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto-MG, felipe.loch@ufop.edu.br

<sup>2</sup> Eng., Universidade Anhembi Morumbi: São Paulo-SP

## 1. INTRODUÇÃO

Os avanços na ciência e tecnologia, nos últimos anos, levaram ao surgimento de novas possibilidades de utilização de matérias-primas alternativas na produção de concreto e argamassa. As questões ambientais e sociais também contribuem para o desenvolvimento de materiais alternativos, com a incorporação de resíduos de diversas origens na fabricação de concreto e argamassas.

Segundo John (2000), o consumo estimado de agregados naturais na produção de concretos e de argamassas é de aproximadamente 220 milhões de toneladas. Considerando o aumento da indústria da construção civil nos últimos anos, este valor pode ser ainda maior. Segundo Ângulo (2000) a indústria da construção civil causa vários impactos no meio ambiente, como a destruição e modificação do habitat de vários seres vivos através do desflorestamento e alteração da topografia, a liberação de gás carbônico na atmosfera durante a fabricação do cimento, disposição dos resíduos de construção e demolição (RCD) em aterros.

O reaproveitamento e reciclagem dos resíduos de construção e demolição gerados, de acordo com John (1996), são práticas que se destacam frente a abordagem de sustentabilidade. A indústria da construção civil apresenta uma boa alternativa para a utilização de materiais reciclados, porque o mercado atua em todas as regiões do país, possuindo matéria em abundância, diminuindo os gastos com transporte.

A adoção da reciclagem e reuso de RCD apresenta vantagens, tais como a redução da poluição do entulho, a diminuição de áreas necessárias em aterros sanitários, preservação de reservas naturais de matérias primas, pois os materiais desenvolvidos a partir da reciclagem, passam a substituir outros que antes eram obtidos através de fontes naturais, garantindo proteção ao meio ambiente e colaborando a economia (ZORDAN, et al. 2004).

As argamassas são constituídas basicamente pela composição dos agregados miúdos e pelos aglomerantes. O agregado miúdo tem a principal função de inibir a alteração de volume das argamassas, bem como baratear o custo, e os aglomerantes tem a função de promover a união entre os grãos dos agregados, funcionando como material ligante (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O desempenho de um material cimentício depende da seleção criteriosa dos muitos materiais disponíveis para sua composição e das proporções de seus constituintes. Com o uso de ferramentas estatísticas e matemáticas para dosagem de materiais é possível modelar, simular e otimizar as propriedades desejadas de misturas em função de seus componentes.

O objetivo desse trabalho foi analisar a substituição de agregado miúdo por areia de fundição em mistura de uma argamassa, em níveis de 0 a 50%. O estudo foi realizado utilizando a técnica de planejamento fatorial fracionado  $3^{3-1}$  para o projeto em análise dos experimentos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, após 7 dias de cura, como uma função dos fatores teor de ADF, relação água-cimento e relação agregado-cimento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

O cimento utilizado nas misturas foi o CP – V ARI, para obter maior rapidez na cura da argamassa. Foi utilizado o aditivo da marca Vedalit com a intenção de melhorar a cura e resistência, o mesmo foi adicionado a mistura conforme as orientações da embalagem do fabricante.

O agregado miúdo utilizado foi constituído por areia média, com diâmetros entre 0,06 e 2,0 mm. Foi encontrado um modulo de finura de 2,10 pra areia, e sua dimensão máxima característica foi de 4,8 mm.

Foram utilizados Resíduos de Construção e Demolição (RCD), nas frações areia, material com dimensão máxima de 4,8 mm, módulo de finura de 2,89 e livre de impurezas, cedido pela empresa Multilix, São Paulo/SP. O material passou por uma Unidade de Triagem Mecanizada (UTM), com equipamento capaz de separar os diferentes tipos de materiais reciclados, o qual, além da areia reciclada, resulta também em outros materiais reciclados, como, brita reciclada, rachão e bica corrida.

A Tabela 1 apresenta as propriedades do RCD e da areia utilizada e a Figura 1 apresenta das curvas granulométricas determinadas através da NBR NM 248 (2003).

Tabela 1. Propriedades da areia e RCD.

Propriedade	Areia	RCD	Norma
Módulo de finura	2,10	2,89	NBR NM 248:2003
Massa Específica	2,66 g/cm <sup>3</sup>	2,82 g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 52:2009
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	3%	16%	NBR 7218:2010

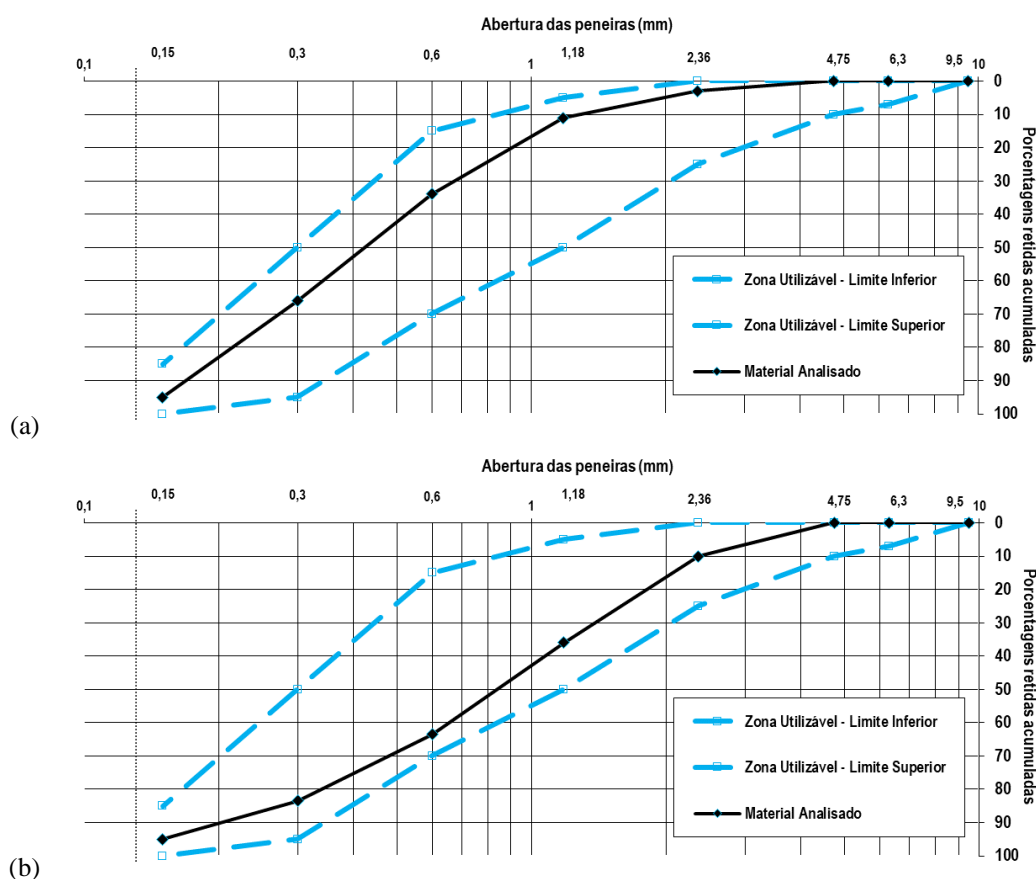


Figura 1. Curvas granulométricas da areia (a) e do RCD (b).

## 2.2. Procedimento Experimental

Para determinação dos limites de cada fator foram realizados testes visando à obtenção de argamassas trabalháveis. Através da utilização do teste de consistência (flow table) pode-se obter uma indicação da trabalhabilidade das misturas. Em todos os ensaios foram descartadas as misturas que apresentaram aspecto muito seco, com índice de consistência abaixo de 130 mm, ou então pouco viscosas, com IC acima de 300 mm, ou seja, as misturas de difícil manipulação. A Tabela 2 apresenta os intervalos estabelecidos para o fator agregado-cimento (A/C), relações de

água-cimento (W/C) e teor de Areia Descartada de Fundição (ADF). Para o aditivo superplastificante foi empregado um teor constante de 0,505%.

Tabela 2. Limites adotados para a dosagem de argamassas.

Traço	A/C (massa)	W/C (massa)	RCD (%)
Baixo	2,166	0,35	0,0
Médio	3,033	0,45	10,0
Alto	3,899	0,55	20,0

Para o planejamento experimental, foi utilizado um projeto fatorial  $3^{3-1}$ , variando-se os fatores A/C, W/C e RCD, para os traços listados na Tabela 1. O planejamento experimental foi delineado com o auxílio do software Statistica 7.1 (StatSoft, Inc, 2007). A Tabela 3 apresenta as composições para as misturas de argamassa.

Tabela 3. Limites adotados para a dosagem das misturas de argamassas.

Mistura	A/C (massa)	W/C (massa)	RCD (%)	Cimento	Aditivo (%)
M1	2,166	0,35	0	1	0,505
M2	2,166	0,45	20	1	0,505
M3	2,166	0,55	10	1	0,505
M4	3,033	0,35	20	1	0,505
M5	3,033	0,45	10	1	0,505
M6	3,033	0,55	0	1	0,505
M7	3,899	0,35	10	1	0,505
M8	3,899	0,45	0	1	0,505
M9	3,899	0,55	20	1	0,505

A mistura dos componentes foi feita em uma argamassadeira mecânica elétrica com capacidade de 5 litros, no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Anhembi Morumbi, Campus Mooca, São Paulo/SP. O teste de consistência foi realizado com a mesa de consistência (Flow Table). Foram utilizados moldes metálicos para corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 50 mm x 100 mm. A cura foi feita pelo tempo de 7 dias, colocando os corpos-de-prova em um tanque com água saturada com hidróxido de cálcio, a 23 °C.

A determinação da resistência à compressão, após 7 dias de cura, foi realizada com o auxílio de uma prensa elétrica, Fortest modelo FT01, com capacidade nominal de 100 tf, no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade Anhembi Morumbi, Campus Mooca, São Paulo/SP. Após a realização dos experimentos e a obtenção da resistência à compressão aos 7, análises estatísticas permitiram avaliar a significância dos efeitos e a obtenção de modelos estatísticos. A análise dos resultados foi realizada com o auxílio do software Statistica 7.1 (StatSoft, Inc, 2007).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 apresenta a média e desvio padrão dos resultados obtidos do índice de consistência e da resistência à compressão para os corpos de prova, após cura 7 dias, das misturas de argamassas.

Tabela 4. Dosagens das misturas e valores médios de IC e RC7.

Mistura	A/C (massa)	W/C (massa)	RCD (%)	IC (mm)	RC7 (MPa)
M1	2,166	0,35	0	217±25,17	27,64±1,60
M2	2,166	0,45	20	285±5,00	11,31±0,38
M3	2,166	0,55	10	320±10,00	10,89±0,64
M4	3,033	0,35	20	238±7,64	7,31±0,49
M5	3,033	0,45	10	285±5,00	20,64±1,93
M6	3,033	0,55	0	282±10,41	12,94±0,41
M7	3,899	0,35	10	247±15,28	19,75±0,58
M8	3,899	0,45	0	218±27,54	6,11±0,68
M9	3,899	0,55	20	215±5,00	12,64±1,04

A Tabela 5 mostra resultados da análise de variância dos dados experimentais do índice de consistência no estado fresco. Adotando um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,10; os fatores A/C quadrático " $x_1^2$ ", W/C linear " $x_2$ ", W/C quadrático " $x_2^2$ ", RCD linear " $x_3$ " e RCD quadrático " $x_3^2$ " mostram-se significantes para o modelo, além das interações entre os fatores.

Tabela 5. Análise de Variância dos valores de Índice de Consistência.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
A/C ( $x_1^2$ )	11851,852	1	11851,852	54,237	0
W/C ( $x_2$ )	674,128	1	674,128	3,085	0,096
W/C ( $x_2^2$ )	672,504	1	672,504	3,078	0,096
RCD ( $x_3$ )	850,694	1	850,694	3,893	0,064
RCD ( $x_3^2$ )	674,622	1	674,622	3,087	0,096
$x_1 \cdot x_2$	671,118	1	671,118	3,071	0,097
$x_1 \cdot x_3$	673,328	1	673,328	3,081	0,096
Fala de Ajuste	138,889	1	138,889	0,636	0,436
Erro	3933,33	18	218,519		
Total	38379,63	26			

A Tabela 5 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ( $p = 0,436 \geq \alpha$ ). A proporção de variabilidade na medida do IC que é explicada pelos fatores W/C, A/C e teor de RCD,  $R^2$ , obtida na análise de variância, é  $R^2 = 0,894$ . A equação final ajustada para o modelo do IC pode ser representada pela Eq. (A), na qual  $x_1$  representa os valores do fator A/C,  $x_2$  do fator W/C e  $x_3$  do fator RCD.

$$IC = -24,08 x_1^2 - 5893,86 x_2 + 5327,40 x_2^2 + 38,06 x_3 - 0,78 x_2^2 + 425,62 x_1 x_2 - 7,27 x_1 x_3 + 1417,24 \quad (\text{Eq. A})$$

Para avaliar a adequação do modelo proposto pela equação (A) foi necessário analisar os resíduos (diferença entre os valores experimentais e os preditos pela equação do modelo), a respeito das suas distribuições quanto à normalidade e aleatoriedade. Os resíduos devem estar distribuídos aleatoriamente, seguindo uma distribuição normal, em torno de uma média zero, com uma variância constante (MYERS & MONTGOMERY, 2002; MONTGOMERY, 2009). Após as análises das curvas de resíduos obtidas por meio do Statistica, pode-se afirmar que o modelo descrito pela equação (A) é adequado para descrever o comportamento da IC como uma função do teor de RCD e das relações W/C e A/C.

O efeito dos fatores A/C, W/C e RCD no IC pode ser estudado melhor quando se analisa a Figura 2 na forma de gráfico de contorno, o qual apresenta o efeito da relação agregado-cimento (A/C) e quantidade de RCD, para relações W/C constantes.

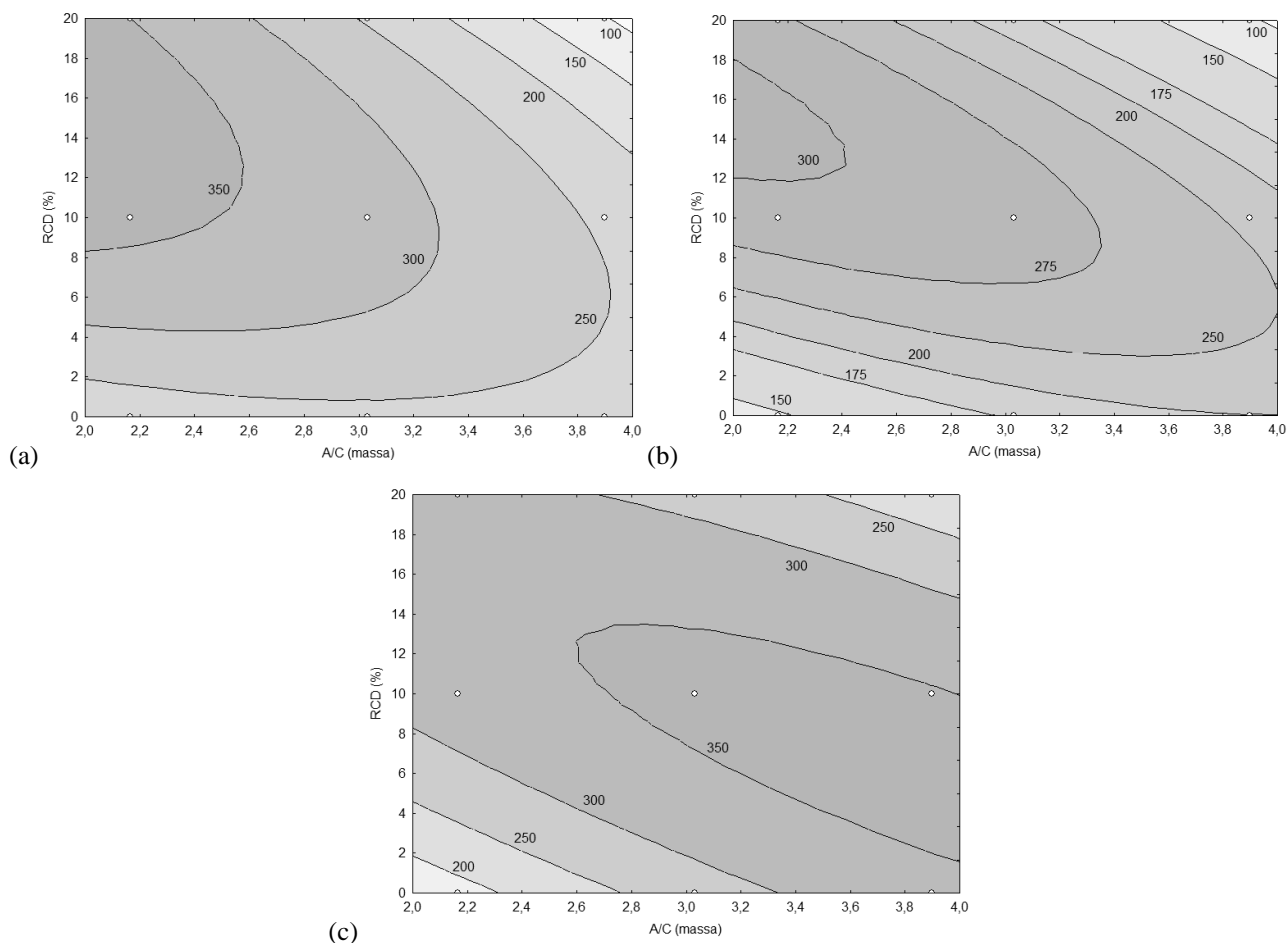


Figura 2. Projeções das superfícies de resposta de IC (a) com W/C = 0,35 (b) W/C = 0,45 e (c) W/C = 0,55.

As misturas de argamassa avaliadas apresentaram IC entre 215 e 320 mm (Tabela 4). A Figura 1 evidencia que os três fatores A/C, W/C e RCD exercem influência sobre a variável resposta IC. Os gráficos de contorno (Figura 2) apresentaram comportamento de pico, com valores máximos. Há uma tendência de aumento dos valores de IC para quantidades médias (10%) de RCD.

A Tabela 6 mostra resultados da análise de variância dos dados experimentais da resistência à compressão após 7 dias de cura. Adotando um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05, os fatores A/C linear " $x_1$ ", A/C quadrático " $x_1^2$ ", W/C quadrático " $x_2^2$ ", RCD linear " $x_3$ " e RCD quadrático " $x_3^2$ " mostram-se significantes para o modelo, além das interações entre os fatores.

Tabela 6. Análise de Variância dos valores de Resistência à Compressão após 7 dias de cura.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
A/C ( $x_1$ )	28,8592	1	28,8592	28,4944	0,0000
A/C ( $x_1^2$ )	7,1216	1	7,1216	7,0316	0,0162
W/C ( $x_2$ )	202,6114	1	202,6114	200,05	0,0000
RCD ( $x_3$ )	308,0424	1	308,0424	304,1482	0,0000
RCD ( $x_3^2$ )	509,4155	1	509,4155	502,9755	0,0000
$x_1 \cdot x_2$	528,1436	1	528,1436	521,4669	0,0000
$x_1 \cdot x_2^2$	193,6363	1	193,6363	191,1883	0,0000
Fala de Ajuste	1,2813	1	1,2813	1,2651	0,2755
Erro	18,2305	18	1,0128		
Total	1185,1804	26			

A Tabela 6 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ( $p = 0,2755 \geq \alpha$ ). A proporção de variabilidade na medida da compressão que é explicada pelos fatores W/C, A/C e teor de RCD, obtida na análise de variância, é  $R^2 = 0,984$ . A equação final, proposta pelos autores, ajustada para o modelo pode ser representada pela equação B, na qual "x<sub>1</sub>" representa os valores do fator A/C, "x<sub>2</sub>" do fator W/C e "x<sub>3</sub>" do fator RCD.

$$RC7 = -12,513 x_1 - 1,451 x_1^2 - 392,334 x_2^2 + 2,338 x_3 - 0,133 x_3^2 - 106,532 x_1 x_2 + 236,509 x_1 x_2^2 + 114,469 \quad (\text{Eq. B})$$

Para avaliar a adequação do modelo proposto pela equação B foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos e a verificação dos resíduos versus valores previstos. Estes gráficos mostraram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo apresentado pela equação B é adequado para descrever o comportamento de RC7 das misturas de argamassa como uma função do teor de RCD e das relações W/C e A/C.

A Figura 3 apresenta o efeito dos fatores A/C, W/C e RCD sob a RC7 na forma de gráficos de contorno. Pode-se observar, na Figura 3, que as misturas com menores valores de W/C apresentaram os maiores valores de RC. Os maiores valores de resistência foram encontrados nas misturas com nível médio de RCD (10%). Também é possível observar, na Figura 3, que os três fatores A/C, W/C e RCD exercem influência sobre a variável resposta RC. Os gráficos de contorno (Figura 3) mostraram que, com o aumento do fator W/C, houve uma mudança da tendência de maiores valores de RC7.

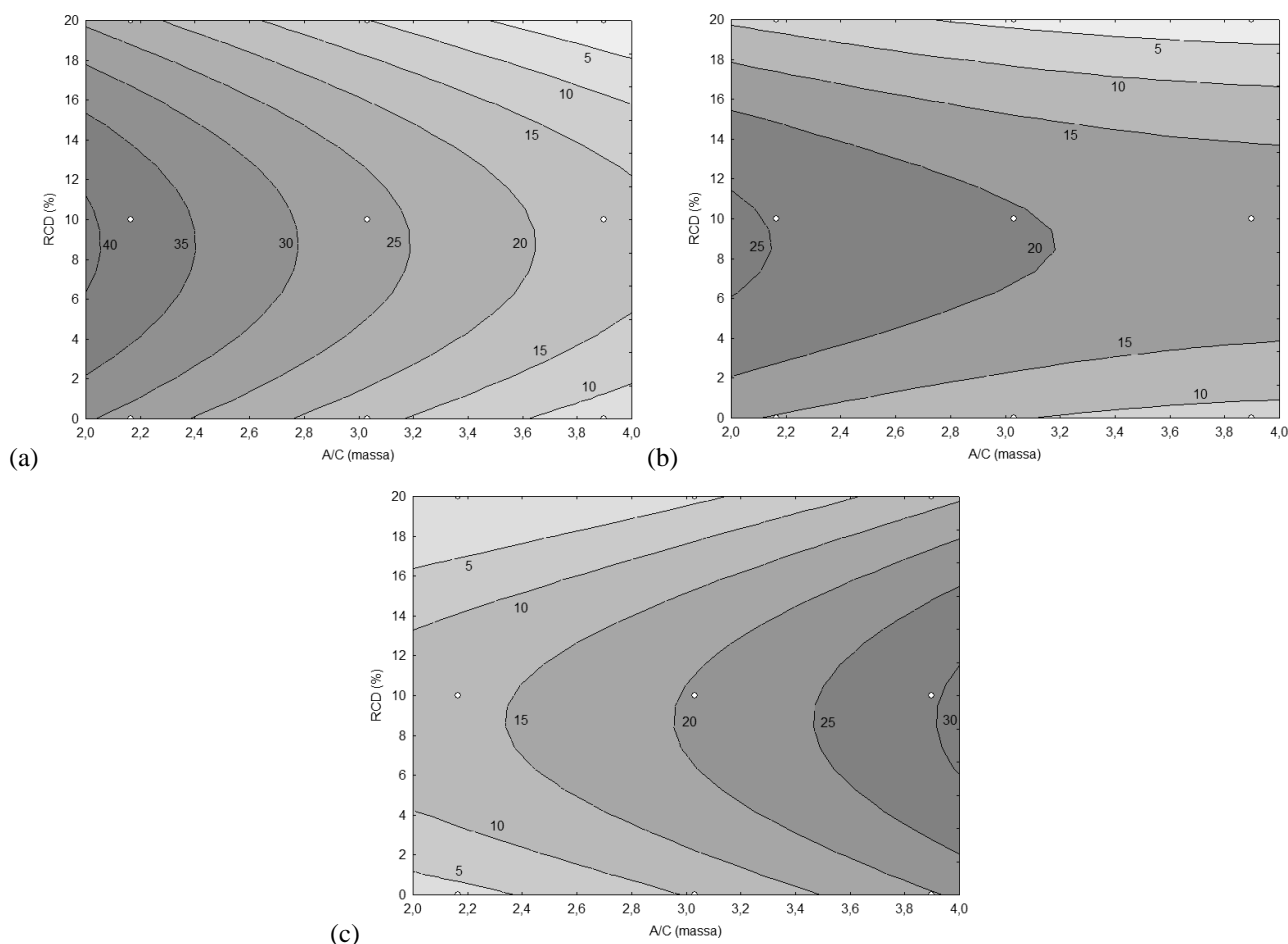


Figura 3. Projeções das superfícies de resposta de RC7 com (a) W/C = 0,35 (b) W/C = 0,45 e (c) W/C = 0,55.

O planejamento experimental utilizando um projeto fatorial fracionado  $3^{3-1}$  e o uso da metodologia de superfícies de respostas mostrou-se eficiente no estudo do índice de consistência e da resistência à compressão das misturas de argamassas e possibilitou o cálculo de um modelo de regressão que descreve as características medidas em função dos materiais utilizados.

A substituição parcial da areia por RCD em níveis de 0 a 20 %, em massa, permitiu produzir argamassas com resistências à compressão após 7 dias de cura de 7 a 27 MPa, de acordo com a Tabela 4. As projeções das superfícies de resposta (Figura 2) mostraram que as misturas produzidas com os valores médios de RCD (10%) permitiram atingir os maiores valores de RC7.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os resultados mostraram que a substituição parcial do agregado miúdo por resíduos da construção e demolição (RCD) promoveram alterações nos valores de índice de consistência (IC) e de resistência à compressão aos 7 dias de cura (RC7).

O planejamento fatorial fracionado  $3^{3-1}$  e o método de superfície de resposta foram eficientes para avaliação do índice de consistência e da resistência à compressão das misturas de argamassas. O uso combinado dessas ferramentas permitiu a compreensão da ação dos diferentes traços com variação da quantidade de água, agregados e adição de resíduos de construção e demolição sobre o índice de consistência e a resistência à compressão simples.

As variáveis escolhidas: relação agregados/cimento (A/C), fator água/cimento (W/C) e porcentagem de resíduos de construção e demolição (RCD) se mostraram significativas e os modelos de regressão apresentados foram eficientes na previsão do índice de consistência e resistência à compressão das misturas de argamassa.

Os resultados de resistência à compressão, aos 7 dias de cura, (RC7) das misturas de argamassa apresentaram valores médios entre de 7 MPa e 27 MPa para várias dosagens com substituição de agregado miúdo por RCD de até 20%. As projeções das superfícies de resposta mostraram que as misturas produzidas com os valores de RCD de 10% atingiram os maiores valores de RC7. Os modelos e as superfícies de resposta mostraram que os três fatores A/C, W/C e RCD exercem influência sobre a variável resposta RC7.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o apoio da Universidade Anhembi Morumbi para a realização desta pesquisa.

#### **REFERÊNCIAS**

ANGULO, S. C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção de demolição reciclados. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dissertação Mestrado, 2000. 155p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218:

\_\_\_\_\_. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.



JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, São Paulo, 1996.

\_\_\_\_\_. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tese (Livre Docência), 2000. 102p.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 7 ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2009. 656p.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. Montgomery. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. New York: John Wiley and Sons, 2002.

ZORDAN, S. E.; JOHN, W. M. Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos. São Paulo: EPUSP, Boletim Técnico, 2004. 11p.