

MODELAGEM DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR REJEITOS DE TIJOLOS (RTP)

S.L. Correia¹, F.C. Loch¹, A. Schackow¹, A.M. Segadães²

¹ Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas (UDESC/CCT), Joinville, SC

² Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro (CICECO), Aveiro, Portugal

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo no qual cimento Portland foi substituído parcialmente por rejeitos particulados de tijolos (RPT), como material pozolânico ativo, em concretos para construção. A investigação foi realizada utilizando a técnica de planejamento fatorial fracionado 3^{3-1} para o projeto e análise de experimentos. Para cada fator, três níveis foram selecionados: teor de RTP em substituição ao cimento (10, 20 e 30 %, em peso), relações água-cimento (W/C, de 0,37, 0,45 e 0,55 em peso), e relações agregado-cimento (A/C, de 2,36, 3,64 e 4,70 em peso). A resistência à compressão aos 28 dias foi medida em corpos de prova. Com os resultados, análises estatísticas possibilitaram avaliar os efeitos dos fatores na resistência. Os resultados mostraram que é possível produzir concretos com resistência à compressão de 25 a 50 MPa, substituindo até 30 % em massa de cimento Portland por rejeitos particulados de tijolos.

Palavras-chave: Concreto; Planejamento fatorial; Resistência à compressão; Rejeitos de tijolos.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, avanços na ciência e tecnologia proporcionaram um entendimento mais científico das características de matérias-primas e processos relacionados às propriedades e usos de materiais para a construção civil. Tais

inovações permitiram o surgimento de novas possibilidades de utilização de matérias-primas alternativas na produção de concretos e argamassas.

As questões ambientais e sociais também contribuem para a busca de materiais alternativos, com a incorporação de resíduos das mais variadas fontes na produção de concretos e argamassas, auxiliando na preservação do meio ambiente e na conservação dos recursos naturais ⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾.

No processo industrial de fabricação de tijolos e telhas estruturais de cerâmica vermelha, grandes quantidades dos produtos finais são rejeitadas no Brasil. Os defeitos mais comuns compreendem as etapas moldagem, secagem e queima, originando produtos com características mecânicas e dimensionais fora de especificações. Tais imperfeições impossibilitam a comercialização desses produtos, os quais são geralmente empregados como material de aterro.

Por causa das vantagens técnicas e econômicas, a possibilidade de se utilizar argila calcinada como uma fonte alternativa de material pozolânico tem sido muito difundida ultimamente ^{(5), (7)}. Uma possível fonte de pozolana é a argila calcinada (em forma de metacaulinita) que é comumente encontrada em peças de argila queimadas entre 700 e 1000 °C ⁽⁹⁾, como é o caso de tijolos estruturais de cerâmica vermelha.

Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar o efeito da substituição parcial de cimento Portland por rejeitos particulados de tijolos de cerâmica vermelha em concretos para construção civil. Um projeto fatorial fracionado 3^{3-1} foi utilizado para o planejamento e análise dos valores medidos para a resistência a compressão após 28 dias de cura, como uma função dos fatores teor de rejeitos de tijolos, relação água-cimento e relação agregado-cimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Os materiais utilizados foram:

(a) Cimento Portland, tipo CP II – Z32, comercialmente usado na região.

(b) Rejeitos particulados de tijolos, provenientes de rejeitos na fabricação de tijolos da Cerâmica Geraldi Ltda., Joinville, SC. As amostras foram moídas em moinhos de bolas a seco até a obtenção de um pó com granulometria inferior a 300 µm.

(c) Agregado graúdo, formado por brita artificial, retirada de rochas também da região norte do Estado de Santa Catarina.

(d) Agregado miúdo, constituído por areia média extraída de rios da região nordeste do estado de Santa Catarina, com módulo de finura de 2,34 e a dimensão máxima característica do agregado igual a 2,4mm.

(e) Água, fornecida pela concessionária local.

2.2. Procedimento experimental

Optou-se como ponto de partida para a pesquisa um traço de concreto denominado piloto com resistência à compressão calculada de 32 MPa, fator água-cimento (W/C) de 0,45 e relação agregado-cimento (A/C) igual a 3,64. A partir deste traço foram estabelecidas as variações para cada um dos fatores (W/C, A/C, RPT) conforme a Tabela 1.

Os traços estabelecidos com as variações dos fatores para cima e para baixo foram denominados traço forte e traço fraco respectivamente.

Tabela 1. Limites adotados para a dosagem de concretos.

Traço	Fator W/C (massa)	Fator A/C (massa)	RPT (%)
Forte	0,37	2,36	10
Piloto	0,45	3,64	20
Fraco	0,55	4,70	30

Para o planejamento experimental, foi utilizado um projeto fatorial 3^{3-1} , variando-se os fatores teor de RPT (%), Fator W/C (massa) e Fator A/C (massa), para os traços listados na Tabela 1. O planejamento experimental foi delineado com o auxílio do software Statística 7.1 (StatSoft, Inc, 2007). A Tabela 2 apresenta as composições para as misturas de concretos com RPT e sem RPT.

A operação de mistura dos componentes foi feita em uma betoneira comum com capacidade de 120 litros, no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UDESC/CCT – Joinville. Para a moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados moldes metálicos para corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 200 mm x 100 mm. A cura foi feita colocando-se os corpos-de-prova em um tanque com água saturada com hidróxido de cálcio, a 23 °C, pelo tempo de 28 dias, após o qual eles foram caracterizados.

A determinação da resistência à compressão, após 28 dias de cura, foi realizada com o auxílio de uma prensa hidráulica, informatizada, marca EMIC, modelo PC 200 I, com capacidade nominal de 200 tf, no laboratório de Materiais de Construção Civil, do departamento de Engenharia Civil da UDESC/CCT – Joinville. Após a realização dos experimentos e a obtenção da resistência à compressão aos 28 dias, análises estatísticas permitiram avaliar a significância dos efeitos e a obtenção de modelos estatisticamente significantes. A análise dos resultados foi realizada com o auxílio do software Statistica 7.1 (StatSoft, Inc, 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Valores medidos para a RC 28, análise de variância e modelo de regressão

A Tabela 2 apresenta os traços das misturas de concretos e os valores medidos para a resistência à compressão após 28 dias de cura (RC 28).

Tabela 2. Traços e valores medidos para a RC 28 dos concretos.

	Mistura	Fator W/C (massa)	Fator A/C (massa)	RPT (%)	RC28 (MPa)
1º Moldagem	1	0,37	2,36	10	43,98±3,62
	2	0,37	3,64	30	52,45±1,56
	3	0,37	4,70	20	50,12±0,61
	4	0,45	2,36	30	33,10±2,12
	5	0,45	3,64	20	38,81±0,89
	6	0,45	4,70	10	33,42±0,98
	7	0,55	2,36	20	27,73±1,07
	8	0,55	3,64	10	25,70±0,56
	9	0,55	4,70	30	26,29±0,63
Réplica	1	0,37	2,36	10	49,30±1,66
	2	0,37	3,64	30	53,04±0,19
	3	0,37	4,70	20	48,38±1,86
	4	0,45	2,36	30	38,75±1,46
	5	0,45	3,64	20	41,50±2,64
	6	0,45	4,70	10	36,13±1,35
	7	0,55	2,36	20	26,29±0,62
	8	0,55	3,64	10	25,14±2,77
	9	0,55	4,70	30	32,80±1,12
Padrão	Forte	0,37	2,36	0	44,25±1,18
	Piloto	0,45	3,64	0	33,10±1,47
	Fraco	0,55	4,70	0	25,51±0,94

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de variância dos dados experimentais da resistência à compressão após 28 dias de cura (RC 28). De acordo com a Tabela 3, observou-se que apenas os fatores W/C linear (x_1) e quadrático W/C (x_1^2), A/C quadrático (x_2^2) e RPT linear (x_3) são marginalmente significantes. Assim, as interações entre os fatores A/C linear e RPT quadrático foram ignorados no modelo final.

Admitindo um nível de significância, α , de 0,14 para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula), a Tabela 4 mostra que os fatores W/C linear ($p = 0,0001 \leq \alpha$), o fator W/C quadrático ($p = 0,0678 \leq \alpha$), o fator A/C quadrático ($p = 0,1386 \leq \alpha$), e o fator RPT linear ($p = 0,0331 \leq \alpha$), são estatisticamente significantes para o nível de significância estipulado (0,14).

Tabela 3. Análise de variância da RC 28 com os efeitos estatisticamente significantes e insignificantes do modelo.

Fonte	Soma Quadrados	Graus Liberdade	Média Quadrados	F	p
W/C (x_1)	278,02	1	278,02	40,70	0,0001
W/C (x_1^2)	29,42	1	29,42	4,31	0,0678
A/C (x_2)	7,52	1	7,52	1,10	0,3214
A/C (x_2^2)	19,07	1	19,07	2,79	0,1291
RPT (x_3)	43,16	1	43,17	6,32	0,0331
RPT (x_3^2)	6,72	1	6,73	0,98	0,3470
Falta de Ajuste	11,50	2	5,75	0,84	0,4621
Erro	61,47	9	6,83		
Total	1638,41	17			

Tabela 4. Análise de variância da RC 28 com os efeitos estatisticamente significantes do modelo.

Fonte	Soma Quadrados	Graus Liberdade	Média Quadrados	F	p
W/C (x_1)	278,02	1	278,02	40,70	0,0001
W/C (x_1^2)	29,42	1	29,42	4,31	0,0678
A/C (x_2^2)	18,34	1	19,07	2,64	0,1386
RPT (x_3)	43,16	1	43,17	6,32	0,0331
Falta de Ajuste	11,50	2	5,75	0,94	0,4823
Erro	61,47	9	6,83		
Total	1638,41	17			

A Tabela 4 também mostra que o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,4823 \geq \alpha$). A proporção de variabilidade na medida da RC 28 que é explicada pelos fatores W/C, A/C e teor de RPT, R^2 , obtida na análise de variância, é relativamente elevada, $R^2 = 0,946$. De acordo com o exposto acima, a equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela Equação (A), na qual x_1 representa os valores do fator W/C, x_2 do fator A/C e x_3 do fator RPT.

$$RC28 = -435,989x_1 + 339,722x_1^2 + 0,074x_2^2 + 0,19x_3 + 159,549 \quad (A)$$

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 ⁽¹⁰⁾ Após as análises das curvas de resíduos obtidas por meio do software Statistica, pode-se afirmar que o modelo descrito pela equação (A) é adequado para descrever o comportamento da RC 28 como uma função do teor de RPT e das relações W/C e A/C.

3.2. Contorno da superfície de resposta para a RC 28

O efeito dos fatores W/C, A/C e RPT na RC 28 pode ser melhor estudado quando se analisa as Figuras 1, 2 e 3, na forma de gráfico de contorno.

A Figura 1 representa graficamente o efeito da relação A/C e teor de RPT, para uma relação W/C constante de 0,37. De acordo com a Figura 1, para uma relação W/C de 0,37, a RC 28 aumenta significativamente com o aumento da relação A/C e teor de RPT. Ainda de acordo com a Figura 1, é possível obter concretos de elevada resistência à compressão após 28 dias de cura de 51 MPa para misturas com 30 % em massa de RPT e relações A/C de 2,8 a 4,7, para W/C de 0,37.

Resultados similares podem ser obtidos para as outras diferentes relações W/C, porém com valores menores para a RC 28. De acordo com a Figura 2, é possível obter concretos de resistência à compressão após 28 dias de cura de 39 MPa para misturas com 30 % em massa de RPT e relações A/C de 4,0 a 4,7 e relação W/C de 0,45. Conforme Figura 3, é possível obter concretos de resistência à compressão após 28 dias de cura de 29 MPa para misturas com 30 % em massa

de RPT e relações A/C de 3,3 a 4,7 e relação W/C de 0,55.

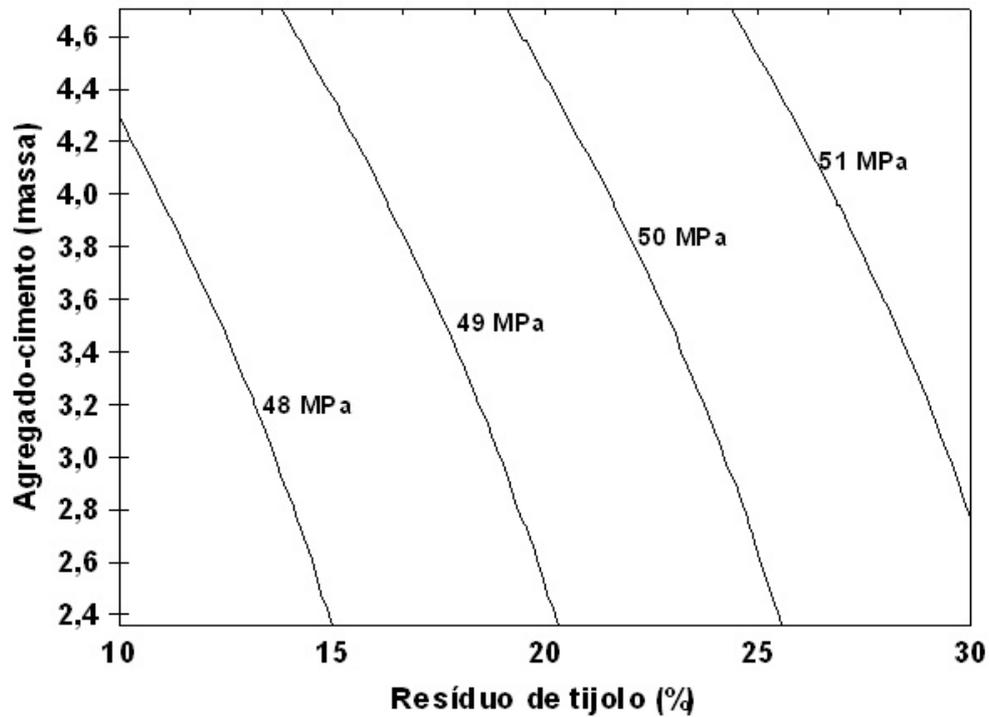


Figura 1. Gráfico de contorno da superfície de resposta da RC 28 como uma função dos fatores A/C e RPT (W/C = 0,37 constante).

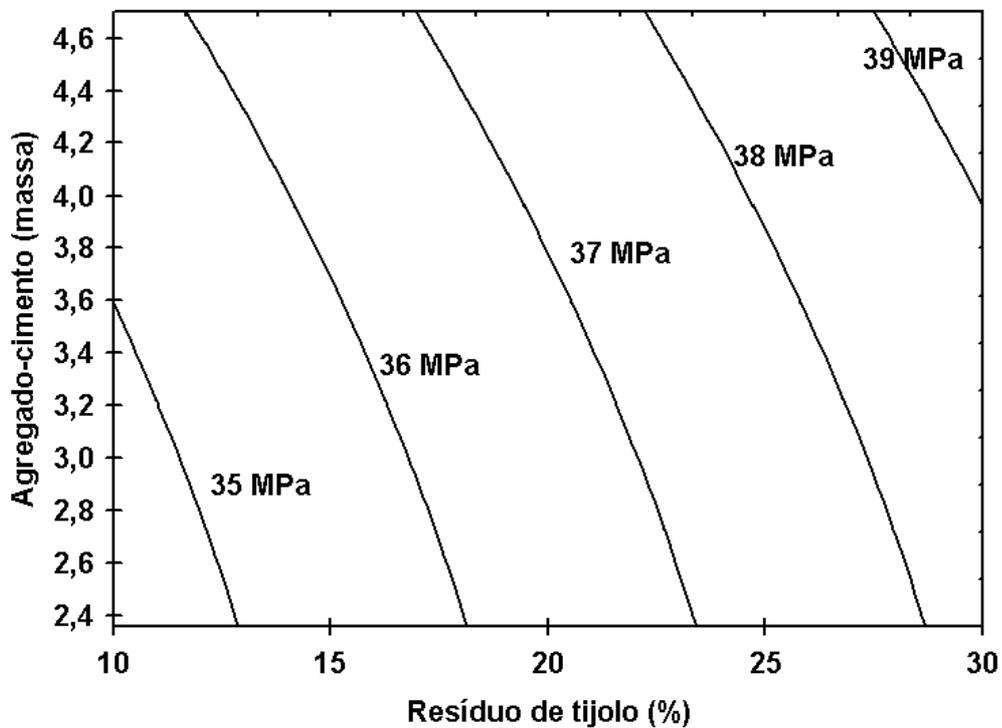


Figura 2. Gráfico de contorno da superfície de resposta da RC 28 como uma função dos fatores A/C e RPT (W/C = 0,45 constante).

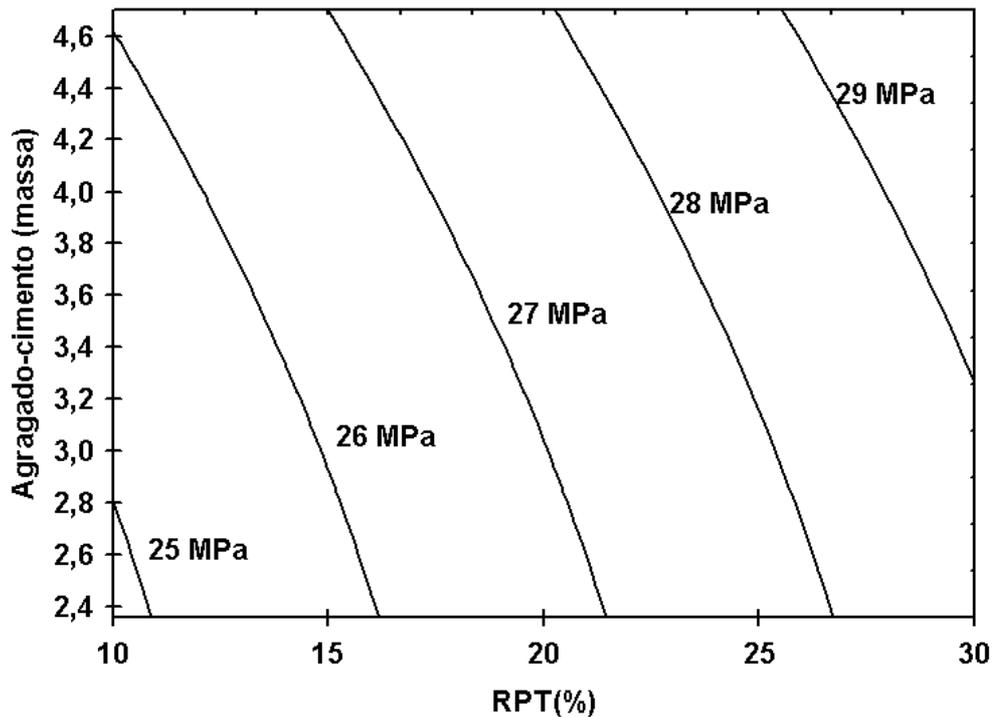


Figura 3. Gráfico de contorno da superfície de resposta da RC 28 como uma função dos fatores A/C e RPT ($W/C = 0,55$ constante).

As Figuras 1, 2 e 3 mostram que o aumento da resistência é função principalmente do fator W/C . Os valores mais altos de resistência foram encontrados para o fator água cimento mais baixo, nesse caso 0,37. Os resultados mais altos de resistência foram encontrados para valores em torno de 30% de RPT.

4. CONCLUSÕES

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 da resistência à compressão após 28 dias de cura de concretos produzidos com a substituição parcial de cimento Portland por rejeitos particulados de tijolos. A técnica possibilitou o cálculo de um modelo de regressão que descreve, em função do teor de resíduo particulado de tijolo, relação água-cimento e relação agregado-cimento, a resistência à compressão de concretos após 28 dias de cura.

Esta técnica pode ser usada para selecionar as melhores combinações dos parâmetros para a fabricação de concretos. A substituição parcial do cimento Portland por RPT em níveis de 10 a 30 % em massa, para os níveis de A/C de 2,36 a 4,70 e W/C de 0,37 a 0,55, permitiu produzir concretos com elevadas resistências

à compressão após 28 dias de cura. Os concretos com nível de agregado-cimento mais alto formam os que apresentaram os maiores resultados para a resistência. Usando o valor máximo de rejeitos de tijolos de 30 %, a máxima resistência à compressão após 28 dias de cura de 51 MPa foi obtida usando um traço relação água-cimento de 0,37 e relação agregado-cimento de 3,64.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da UDESC-Joinville (projeto DPPG 460/2009, S. L. Correia) e do CNPq (Conselho Nacional de Pesquisas), na forma de uma bolsa de iniciação científica (F. C. Loch), e são gratos a Cerâmica Geraldi (Joinville, SC, Brasil) pelo fornecimento dos tijolos rejeitados, os quais moídos e usados no trabalho.

REFERÊNCIAS

1. TOPÇU, I. B.; GUNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1385-1390, 1995.
2. POON, C. S.; KOU, S.C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 281-289, 2002.
3. SEGRE, N.; JOEKES, I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1421-1425, 2000.
4. CORINALDESI, V; GIUGGIOLINI, M.; MORICONI, G. Use of rubble from building demolition in mortars. **Waste Management**, v. 22, p. 893-899, 2002.
5. SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 910-913, 2005.
6. CHEN, C. H.; HUANG, R.; WU, J. K., YANG, C. C. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 449-456, 2006.
7. AGARWAL, S. K., Pozzolanic activity of various siliceous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1735-1739, 2006.
8. HOLT, E., RAIVIO, P. Use of gasification residues in compacted concrete paving blocks. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 441-448, 2006.

9. WILD, S, KHABIT, J. M., JONES, A. Relative strength pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised MK concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 1537-1544, 1996.
10. MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. New York: John Wiley and Sons, 2002.

USING FRACTIONAL FACTORIAL DESIGN TO MODEL COMPRESSIVE
STRENGTH OF CONCRETES CONTAINING FIRED CLAY BRICK WASTE (CBW)
AS REPLACEMENT FOR PORTLAND CEMENT

ABSTRACT

This paper presents some of the results of an investigation on the possible applications of use of fired clay brick waste particles (CBW) as replacement for Portland cement in concretes. The investigation was carried out using fractional factorial design 3^{3-1} for the experiments design. For each factor, three levels were selected: CBW of 10, 20 and 30 (wt. %), water-cement ratio, W/C, of 0.37, 0.45 and 0.55 (weight), and aggregate-cement ratio, A/C, of 2.36, 3.64 and 4.70 (weight). The 28-day compressive strength of hardened concrete was evaluated. From the statistical of the results, a regression equation was calculated and effects of the factors on the compressive strength were evaluated as a function of CBW, W/C and A/C. The results showed that it is possible to produce concretes with compressive strength from 25 to 50 MPa, replacing up to 30 wt% of Portland cement by CBW.

Keywords: Concrete; Fractional factorial design; Compressive strength; Clay brick waste.