PLANEJAMENTO FATORIAL PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS CIMENTÍCIOS

B. D de Morais [(1)]; J. O do Nascimento [(2)]; M. M. L. da Silva [(3)]; F. L. F Andrade [(4)]

(1) Graduando em Engenharia Civil pela UnP – brunodiegodemorais@hotmail.com; (2) Graduando em Engenharia Civil pela UnP – jonatho21@gmail.com; (3) Graduando em Engenharia Civil pela UnP – marcosmattheus95@hotmail.com; (4) Orientador. Mestre em Engenharia Mecânica. Coordenador do Curso de Engenharia Civil da UnP/Campus Mossoró – felipe.formiga@unp.br.

RESUMO

O elevado volume de resíduos de construção e demolição (RCD) tem contribuído para a geração de impactos ambientais. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo, aplicar o Resíduo Cimentício (parte específica do RCD) como agregado no concreto destinado para produção de blocos de alvenaria estrutural, e em seguida apresentar um modelo estatístico, para a previsibilidade da resistência à compressão. Após os testes, verificou-se que o uso combinado de agregado graúdo reciclado com agregado miúdo natural é viável na aplicação em estruturas, podendo resultar em desempenho 25,51% superior ao concreto padrão. Para não prejudicar a textura deve-se evitar a utilização de agregado graúdo acima de 50% da massa para agregados e umidade acima de 10,5%.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição, planejamento fatorial, blocos de concreto.

INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente e a busca de minimizar os impactos ambientais tem provocado intensas discussões sobre indústrias sustentáveis, principalmente a da construção civil, que possui uma significativa representação mundial no dispêndio dos recursos naturais em todo o mundo.

Com base nessa problemática, essa pesquisa tem como objetivo substituir o agregado natural por agregado reciclado na produção de concreto destinado a produção de blocos de alvenaria estrutural. Sendo esse material reciclado obtido de resíduos de classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados: tijolos, concreto, etc. – provenientes de construção, demolições e/ou reformas (Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA 307/2002), especificadamente, o resíduo cimentício (resto de concreto e argamassa, parte específica do RCD), como forma de restringir a grande variabilidade de materiais que compõem o rejeito.

Após a substituição do agregado no concreto, propor um modelo estatístico fundamentado no planejamento fatorial, intencionando determinar a interferência das variáveis (consumo de cimento, umidade e consumo de agregado graúdo reciclado) sobre a resistência à compressão (resposta), estudando a viabilidade desse concreto, analisando previamente seu desempenho e até que ponto, o mesmo pode substituir com qualidade e segurança o concreto padrão empregado na produção de blocos de alvenaria estrutural.

METODOLOGIA

A metodologia da presente pesquisa foi dividida em três eixos centrais: Classificação dos resíduos; Produção do concreto e planejamento fatorial.

Classificação dos resíduos

Os ensaios realizados na caracterização dos materiais e suas respectivas normas estão descritos na Tabela 1:

Tabela 1 – Caracterização dos Materiais.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	
ENSAIO	**NORMA**
Determinação da composição granulométrica dos Agregados	NBR NM 248 (2003)
Determinação de massa específica e absorção de água dos agregados graúdos	NM 53 (2009)
Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem dos agregados	NBR NM 46 (2003)
Determinação de massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo	NM 52 (2002)

Fonte: Autores

Produção do concreto e corpos-de-prova

A dosagem dos concretos empregada no experimento, obedeceu ao método desenvolvido por Frasson Junior (2000)[1], baseado na utilização do concreto seco com abatimento zero para a produção de blocos de alvenaria estrutural e/ou de vedação. Abaixo estão descritos os materiais e equipamentos utilizados no experimento:

Materiais utilizados:

- Agregado graúdo natural (brita granítica com diâmetro máximo 9.5 mm, conhecida como pedrisco). Utilizado somente no concreto de referência;
- Agregado graúdo reciclado graúdo no intervalo de 4,75 mm ≤ d < 9,5 mm;
- Agregado miúdo natural (areia de rio);
- Agregado miúdo utilizada no intervalo 0,6 mm ≤ d ≤ 1,18 mm (classificada como: areia grossa);
- Cimento Portland (CPV ARI-RS) de alto desempenho inicial.

Equipamentos utilizados:

- Corpos-de-prova de 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura), bipartidos, confeccionados com material PVC;
- Um Martelo de borracha;
- Um soquete de compactação de argamassa;
- Um tarugo de náilon.

Execução do concreto:

Primeiramente, foram pesados todos os materiais através da balança (Mark semi-analítica com capacidade de 4200g e resolução 0.01g, modelo L4202), de acordo com a dosagem dos traços adotados. Em seguida, os materiais foram inseridos, parte à parte, na argamassadeira eletromecânica (Pavitest, com capacidade para 5 litros, modelo I-3010), por um tempo de três minutos após a colocação de todos os materiais, até que a consistência desejada fosse obtida. Devido à alta absorção dos agregados reciclados, eles foram pré-moldados (com 10% do valor total de água do traço), antes do início da mistura, para não prejudicar a resistência do compósito final.

Produção dos corpos-de-prova:

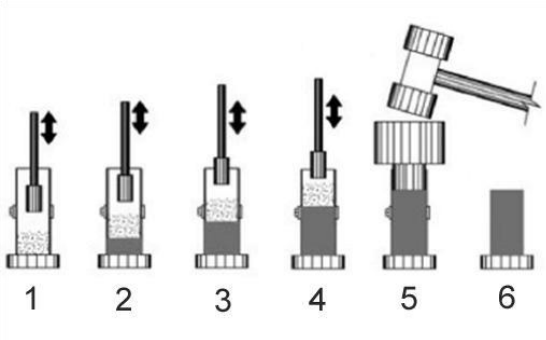


Figura 1 – Sequência esquemática de moldagem dos corpos-de-prova de 5 cm x 10 cm.
Fonte: Frasson Junior, 2000[1].

Após o preparo, o concreto foi inserido no molde e dividido em 4 porções iguais (1ª, 2ª e 3ª camada), aplicando 20 golpes em cada camada com a utilização do soquete para compactação da argamassa. A compactação da última camada, foi realizada com um martelo de borracha para obtenção da altura almejada (cerca de 10 cm) no final do processo (Figura 1).

Após a realização de tal procedimento, os corpos-de-prova foram desmoldados logo após a moldagem, devidamente identificados e inseridos cuidadosamente no isopor para realização da cura.

Durante a cura, os corpos-de-prova foram borrifados com água. Após os 14 dias, os corpos-de-prova que durante a moldagem permaneceram com altura superior a 10 cm, foram regularizados na retífica. Logo após, foi realizado o rompimento dos corpos-de-prova para análise da resistência à compressão (Figura 2), seguindo as determinações e procedimentos da ABNT NBR 5739 (2007)[2].

Paralelamente aos ensaios, foram produzidos 6 corpos-de-prova de referência com agregados graúdos e miúdos natural, para que fosse possível realizar as comparações entre os resultados obtidos com o agregado reciclado.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados após 14 dias de cura, através da Prensa Hidráulica *(EMIC, modelo PC200C, com capacidade para 200 KN)*. Adotou-se os 14 dias de cura, em decorrência do tempo para comercialização dos blocos produzidos em fábricas de pré-moldados, geralmente após um tempo mínimo de cura de 7 a 14 dias, devido a questão de estoque e produção, sendo necessário que com poucos dias de cura, os blocos já atendam a resistência para a qual foram desenvolvidos.

Figura 2 – Moldagem, regularização e rompimento dos corpos-de-prova.
Fonte: Autores

Planejamento fatorial

Para o estudo do efeito das 3 variáveis independentes, foi aplicado um planejamento fatorial completo 2^3 que exige 2 níveis para cada fator e no mínimo 8 ensaios, porém para cada condição foi gerado uma réplica e também foi adicionado 4 repetições no ponto central totalizando 20 ensaios.

Seleção das variáveis independentes:

I. Consumo de cimento

O consumo de cimento foi determinado com base nos seguintes traços de referência: 1:6 e 1:8 (cimento:agregado), almejando alcançar ao final do processo, resistência à compressão entre 10-18 MPa (FRASSON JUNIOR[1], 2000, p. 115). Esses traços foram selecionados com intuito de se obter resistências dentro da faixa de função estrutural recomendada pela ABNT NBR 6136 (2014)[3].

II. Umidade

De acordo com Frasson Junior (2000)[1], os concretos secos utilizados na fabricação de blocos de concreto possuem umidades em suas misturas em torno de 5,5% a 8% com relação a massa total, incluindo o cimento. Entretanto, os ensaios realizados no laboratório só foram possíveis com umidade em torno de 10%, resultando no mesmo valor previsto pela pesquisa de Araújo, Carasek e Cascudo (2010)[4].

III. Consumo de Agregado Graúdo

O agregado graúdo natural foi substituído totalmente pelo agregado graúdo reciclado. Tenório (2007)[5] verificou que a tendência da resistência à compressão foi

de crescer com o aumento da massa específica do agregado graúdo reciclado. Optou-se por manter o nível de agregado graúdo variando entre 40% a 60% do valor da massa total destinada aos agregados no traço. Quanto aos agregados miúdos, Araújo, Carasek e Cascudo (2010)[4], observaram que o nível ótimo de substituição do agregado miúdo reciclado fica em torno de 25%, pois esse valor resultou em um acréscimo de resistência de aproximadamente 16% em relação ao traço de referência. Decidiu-se então, manter o nível de agregado miúdo reciclado constante (correspondendo a 25% da massa destinada ao agregado miúdo), para assim proporcionar a maior substituição de agregado reciclado possível e para os 75% restantes, foi utilizada areia natural. Os níveis de consumo de agregado podem ser verificados na Tabela 2:

Tabela 2 – Valores utilizados em cada nível do planejamento fatorial.

Variáveis	Código	-1	0	+1
Consumo de cimento (%)	X_1	11,11%	12,70%	14,29%
Umidade (%)	X_2	10%	10,5%	11%
Consumo de agregado graúdo (%)	X_3	40%	50%	60%

Fonte: Autores

Seleção da variável dependente:

A resposta do planejamento fatorial aplicado na respectiva pesquisa foi a resistência à compressão, sendo essa o principal parâmetro segundo a ABNT NBR 6136 (2014)[3], para se determinar a função do bloco como sendo de vedação ou estrutural. Ressaltando ainda que os blocos se subdivide nas classes A (resistência acima de 8 MPa), B (resistência entre 4 e 8 MPa) e C (resistência maior que 3 MPa).

RESULTADOS

Os resultados serão apresentados em duas etapas: classificação dos resíduos e a análise do planejamento fatorial.

Classificação dos resíduos

Absorção de Água:

A absorção de água é uma propriedade estreitamente ligada à porosidade do agregado. Isto é, a absorção de água apresenta variabilidade conforme a variação da porosidade do agregado.

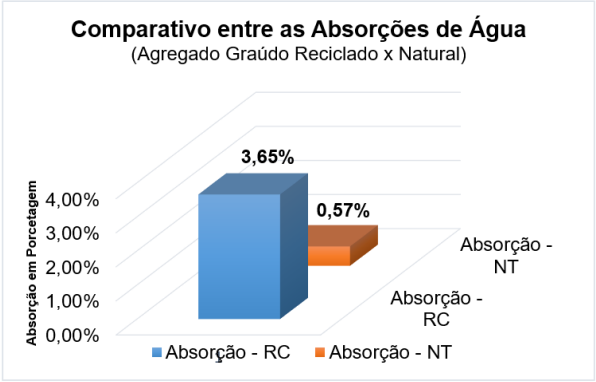


Figura 3 – Absorção de água do agregado graúdo reciclado e natural.
Fonte: Autores

O agregado de concreto reciclado apresentou um índice maior de absorção de água, haja vista a presença de argamassa aderida na superfície do agregado (Figura 3).

Massa Específica:

A massa específica é outra propriedade correlacionada à porosidade, mantendo entre elas uma relação inversamente proporcional. Angulo (2000)[6] em seu estudo, verificou uma tendência dos agregados com maior massa específica apresentarem menor absorção.

Enquanto o agregado graúdo de RC apresentou uma massa específica consideravelmente menor que do agregado natural, os agregados miúdos permaneceram numa mesma faixa (Figura 4).

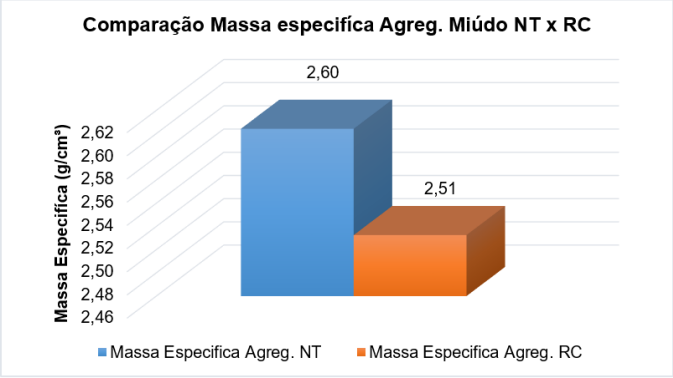
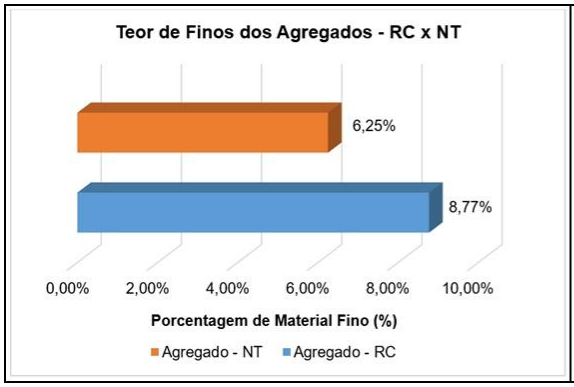


Figura 4 – Massa específica dos agregados miúdos naturais e reciclados.
Fonte: Autores

Granulometria e teor de finos:

O agregado de RC no experimento realizado apresentou um teor de finos maior que no agregado natural (Figura 5 a), considerando a quantidade de materiais pulverulentos presentes em seu exterior. Apesar da variabilidade, os agregados atenderam os limites determinados pela ABNT NBR 15116 (2004)[7].

Quanto a granulometria, os agregados de concreto reciclado não apresentam variações expressivas e sua curva granulométrica (Figura 5 b) pode ser semelhante à dos agregados naturais, quando isentos de partículas finas.



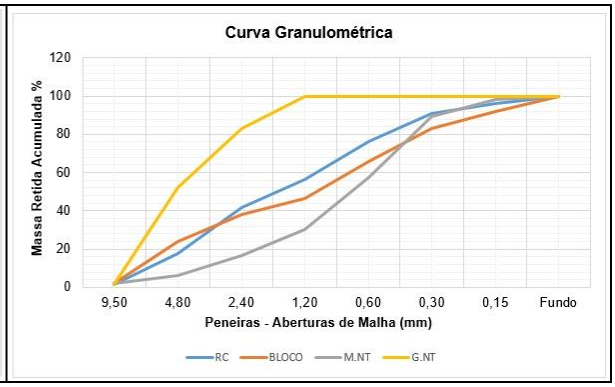


Figura 5 (a) Figura 5 (b)

Figura 5 (a) – Teor de finos dos agregados naturais e reciclados.
Figura 5 (b) – Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos reciclados e naturais.
Fonte: Autores

Os agregados miúdos mostraram uma predisposição a se encaixar na zona utilizável da ABNT NBR 7211 (2005)[8].

Análise do planejamento fatorial

A Tabela 3 discrimina a combinação entre as variáveis em cada uma das corridas, além da resistência média obtida em cada uma delas.

Tabela 3 – Delineamento experimental.

Corridas	Variáveis Codificadas			Variáveis Reais			Resultado
	X_1	X_2	X_3	Cons. de Cimento (%) – X_1	Umidade (%) – X_2	Cons. Agr. Graúdo (%) – X_3	Y (MPa)
1	-1	-1	-1	11,11%	10%	40%	4,00
2	+1	-1	-1	14,29%	10%	40%	10,60
3	-1	+1	-1	11,11%	11%	40%	7,00
4	+1	+1	-1	14,29%	11%	40%	9,50

5	-1	-1	+1	11,11%	10%	60%	10,30
6	+1	-1	+1	14,29%	10%	60%	16,15
7	-1	+1	+1	11,11%	11%	60%	8,75
8	+1	+1	+1	14,29%	11%	60%	16,85
9	0	0	0	12,70%	10,5%	50%	11,9
10	0	0	0	12,70%	10,5%	50%	13,2
11	0	0	0	12,70%	10,5%	50%	9,8
12	0	0	0	12,70%	10,5%	50%	9,7

Fonte: Autores

Durante o ensaio foram produzidos 6 corpos-de-prova de referência feitos com agregados graúdos e miúdos natural, nas condições inferior, central e superior (Tabela 4).

Tabela 4 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova de referência.

Corridas	Variáveis Codificadas			Resultado (MPa)		
	Cons. de Cimento (%)	Umidade (%)	Cons. Agr. Graúdo (%)	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
1	11,11%	10%	40%	8,9	7,6	8,25
2	12,70%	10,5%	50%	12,5	12,6	12,55
3	14,29%	11%	60%	10,3	13,2	11,75

Fonte: Autores

Os corpos-de-prova de referência foram moldados com o objetivo de comparar a influência dos agregados sobre a resistência final do concreto e por isso, não foram adicionados ao planejamento. Em alguns casos, a resistência entre os concretos produzidos com agregado reciclado e agregado natural foram bem próximas, sendo que em algumas condições a resistência do concreto produzido com agregado reciclado foi superior ao concreto padrão de referência.

Ajuste do modelo:

Através dos resultados obtidos foram calculados os coeficientes de regressão (Tabela 5). Observa-se que apenas o consumo de cimento (X1), e o consumo de agregado (X3), foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Tabela 5 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova de referência.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t (5)	p-valor	Estimativas por Intervalo (95%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	10,65	0,50	21,11	0,000004	9,35	11,94
X1	*2,88*	*0,62*	*4,67*	*0,005505*	*1,29*	*4,47*
X2	0,13	0,62	0,21	0,840087	-1,46	1,72

X3	*2,62*	*0,62*	*4,24*	*0,008166*	*1,03*	*4,21*
X1.X2	-0,23	0,62	-0,37	0,723422	-1,82	1,36
X1.X3	0,61	0,62	0,98	0,371341	-0,98	2,19
X2.X3	-0,34	0,62	-0,56	0,601778	-1,93	1,24

Fonte: Autores
Nota: Os dados foram obtidos no software Statística por meio do experimento fatorial.

O modelo ajustado codificado fica caracterizado pela Equação (A):

$$Y(14) = 10,65 + 2,88.X1 + 0,13.X2 + 2,62.X3 – 0,23.X1.X2 + 0,61.X1.X3 – 0,34.X2.X3 \quad (A)$$

Análise de variância:

Tabela 6 – ANOVA para a resposta Y.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F*calc*	p-valor
Regressão	125,72	6	20,95	6,87	0,0258
Resíduo	15,26	5	3,05	-	-
Total	140,98	11	-	-	-

% variação explicada (R^2) = 90% $F_{tab\ 6;\ 5;\ 0,05}$ = 4,95

Fonte: Autores
Nota: Os dados foram obtidos no software Statística por meio do experimento fatorial.

O F*calc* (Tabela 6) para a regressão (6,87) apesar de não muito alto, ainda é maior que o valor tabelado, ou seja, ele é significativo (p: 0,0258 < 0,05) e a porcentagem de variação explicada pelo modelo foi expressiva, conseguindo justificar 90% das respostas obtidas, desta forma, podemos concluir que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

Comprovada a existência de efeitos significativos estatisticamente, construiu-se então, as superfícies de resposta e a curva de contorno para a resposta *Y (14)* (MPa) (Figura 6), resistência à compressão após 14 dias de cura.

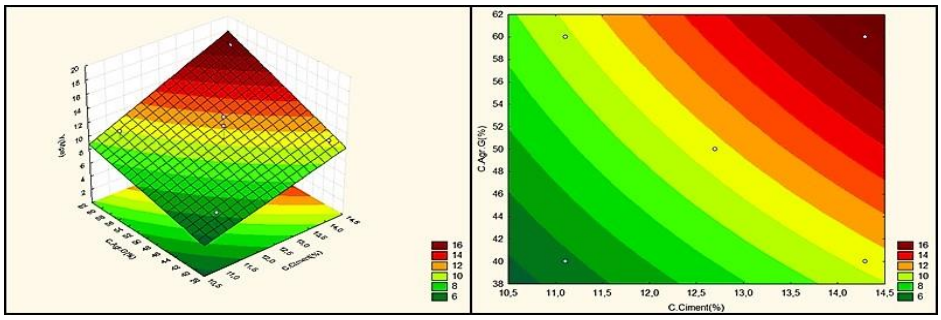


Figura 6 – Superfície de resposta.
Fonte: Autores (obtida no software Statística)

As curvaturas das linhas do gráfico de curvas de contorno, demostram que existe uma interação diretamente proporcional entre o consumo de agregado graúdo e o consumo de cimento, onde já é possível obter ótimos valores de resistência (cerca de 8 MPa), que é um desempenho comercialmente bem aceito, a partir de um consumo de cimento em torno de 11,5% e um consumo de agregado graúdo em torno de 45%.

Segundo Frasson Junior (2000)[1], no ensaio de um corpo-de-prova cilíndrico 5 cm x 10 cm, é possível obter por volta de 80% da resistência que o mesmo traço poderia atingir na área líquida de um bloco. Vale destacar que esse resultado se mostrou praticamente constante para todas as séries e para blocos de diferentes geometrias.

CONCLUSÃO

O agregado artificial se encaixou dentro do que estava previsto na literatura, ou seja, eles apresentam maiores níveis de absorção de água, maior teor de finos e menor massa específica, sendo necessário então a pré-molhagem. Como consequência, na utilização de agregado reciclado foi possível verificar resistência próximas aos corpos-de-prova produzidos com agregado natural e em outros casos especiais, foi possível obter resistência até maiores.

Entretanto, algumas restrições devem ser esclarecidas, pois, através da análise visual dos corpos-de-prova, foi constatado que os níveis de umidade acima de 10,5% causam problema de desforma, tornando os concretos bastante frágeis.

Da mesma forma, o consumo de agregado graúdo acima de 50%, por mais que resultem em resistências maiores, também causa texturas a baixo da exigência do mercado, com o aspecto bastante “rugoso”, com agregado graúdo aparente, mesmo com a compactação adequada, favorecendo assim a absorção de água, por isso, valores acima de 50% na substituição do agregado, devem ser evitados.

REFERÊNCIAS

(1) FRASSON JUNIOR, A. Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural. 2000, 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

(2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. NBR 5739, 2007. Rio de Janeiro.

(3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. NBR 6136, 2014. Rio de Janeiro.

(4) ARAÚJO, A. M.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Dosagem de concreto para blocos contendo resíduo da indústria de artefatos de cimento. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). Canela, RS, 2010. Disponível em: http://www.infohab.org.br/entac2014/2010/arquivos/712.pdf. Acesso em: 18 de agosto de 2016.

(5) TENÓRIO, J.J.L. Avaliação de Propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais. 2007, 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

(6) ANGULO, Sérgio Cirelli. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

(7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural - Requisitos. NBR 15116, 2004. Rio de Janeiro.

(8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto - Especificação. NBR 7211, 2005. Rio de Janeiro.

FACTORIAL DESIGN TO ESTIMATE THE COMPRESSIVE STRENGTH OF MANSORY BLOCKS WITH THE ADDITION OF CEMENT RESIDUE AGGREGATES

ABSTRACT

The large volume of waste generated from construction and demolition (CDW) has greatly contributed to the development of environmental impacts. In this context, this work aims to apply the cement residue (specific part of the CDW) as an aggregate in the concrete destined to the production of masonry blocks, and then present a statistical model to predict the compressive strength. Concurrently, reference concrete was produced with natural aggregates. After tests, it became apparent that the combined use of recycled coarse aggregate with natural fine aggregate may be viable in structures appliances, resulting in some cases, in a 25.51% greater performance compared

to standard concrete, although there are restrictions about using this replacement when the texture is taken into account, not being recommended the usage of recycled coarse aggregate over 50% of the aggregate weight and humidity above 10.5%.

Key words: Construction and demolition waste, factorial design, concrete blocks.