

# Previsão do Desempenho de Blocos de Vedação Produzidos com Resíduos da Construção Civil através de Inteligência Artificial

C. A. S. de Farias<sup>1\*</sup>, H. C. Ferreira<sup>1</sup>, G. A. Neves<sup>1</sup>, D. F. Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58109-970, Campina Grande – PB

<sup>2</sup>Departamento de Química – Universidade Estadual da Paraíba, Rua Juvêncio Arruda, s/n, Bodocongó, CEP 58.109-790, Campina Grande – PB

(Recebido em 11/09/2006; revisado em 19/09/2006; aceito em 24/10/2006)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

---

## Resumo:

A escassez dos recursos naturais e os problemas causados pelo acúmulo de entulhos são os principais responsáveis pelo desenvolvimento de estudos sobre o reaproveitamento de resíduos da construção civil. Este trabalho avalia o desempenho de blocos de vedação produzidos com entulhos e busca, através do uso de redes neurais artificiais (RNAs), definir um modelo capaz de prever a eficiência de dosagens desconhecidas. O procedimento consistiu na moldagem dos blocos de concreto e na obtenção das respectivas resistências à compressão simples e absorções de água. Os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias de cura e as substituições de agregados naturais por entulhos foram nas proporções de 0%, 30%, 60% e 100%. Em geral, os resultados de desempenho estão de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. As características das composições dos blocos moldados foram relacionadas com seus valores de resistência à compressão simples e absorção através de uma RNA. Os resultados de validação obtidos pelo modelo foram investigados e apresentaram índices bastante satisfatórios. Assim, espera-se que o uso desta ferramenta otimize o tempo e as despesas com experimentos durante a determinação da composição ideal para blocos alternativos de concreto.

**Palavras-chave:** Resíduos; blocos de vedação; redes neurais artificiais; inteligência artificial

---

## Abstract:

Scarcity of natural resources and problems caused by debris accumulation are the main responsible for the development of studies about the recycling of civil construction wastes. This work aims at evaluating the performance of non-structural blocks produced with wastes, and the use of artificial neural networks (ANNs) to define a model capable of predicting the efficiency of unknown dosages. The procedure consisted of molding the concrete blocks and obtaining their respective compressive strengths and water absorptions. The tests were carried out at 7 and 28 days of cure and the substitutions of natural aggregates by civil construction wastes were in the proportions of 0%, 30%, 60% and 100%. Most of the results obtained showed values in accordance with the limits established by the Brazilian Association of Technical Norms (ABNT). The characteristics of the molded blocks' compositions were related to the values of compressive strength and water absorption through an ANN. The validation results obtained by the ANN model were very satisfactory. Thus, this model may be thus useful for reducing time and expenses with experiments during the determination of the ideal composition in alternative blocks of concrete.

**Keywords:** Waste; non-structural blocks; artificial neural networks; artificial intelligence.

---

\* E-mail do autor: [camilloallyson@yahoo.com.br](mailto:camilloallyson@yahoo.com.br) (C. A. S. Farias)

## 1. Introdução

A escassez dos recursos naturais e os problemas sociais, ambientais e econômicos causados pelo acúmulo de entulho são os principais motivadores dos estudos sobre o reaproveitamento de resíduos da construção civil. De acordo com Cincotto [1], o próprio setor construtivo possui o maior potencial para a reutilização de seus resíduos. A reciclagem dos entulhos para a produção de pré-moldados surge como uma importante alternativa, entretanto, para que haja aceitação destes materiais alternativos, se faz necessário que algumas de suas características estejam de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT [2]. A busca experimental por composições de materiais que forneçam propriedades de acordo com as normas vigentes e com custos adequados exige um maior gasto de tempo para estudos, além de despesas com matéria-prima e mão-de-obra.

As redes neurais artificiais (RNAs) são ferramentas do ramo da inteligência artificial capazes de extrair modelos e detectar tendências que são muito complexas para serem percebidas por humanos ou outras técnicas computacionais. Diferente dos modelos computacionais convencionais, que usam uma abordagem algorítmica, as RNAs processam a informação de forma similar ao sistema nervoso biológico. Elas possuem um grande número de elementos fortemente ligados (neurônios) trabalhando em paralelo para resolver um problema específico. Estas ferramentas aprendem através de exemplos selecionados cuidadosamente, o que as tornam eficazes para sistemas não-lineares, na adaptação a circunstâncias, e outros [3].

Este trabalho, além de investigar o desempenho dos blocos de vedação fabricados com resíduos da construção civil, utiliza RNAs como suporte teórico para previsão da eficiência de dosagens. Espera-se que o uso desta ferramenta otimize o tempo e os gastos com experimentos durante a determinação da composição ideal dos blocos alternativos de vedação, considerando os parâmetros da ABNT.

## 2. Materiais

Para realização da pesquisa utilizaram-se os seguintes materiais, além da água potável fornecida pela concessionária local.

### 2.1. Cimento Portland

Durante a pesquisa foram utilizados dois tipos de cimento. Na primeira fase adotou-se o cimento

Portland CP II-F-32. Este tipo de cimento possui características adequadas para fabricação de blocos pré-moldados por apresentar filer calcário (6-10%) em sua composição, o que, segundo as normas da ABNT [4], favorece um tempo de pega menor. Na segunda fase da pesquisa, devido à suspensão da fabricação do cimento Portland CP II-F-32, optou-se por utilizar o cimento CP II-Z-32. O CP II-Z-32, de acordo com as normas da ABNT [4], apresenta filer calcário (0-10%) e possui um teor de adição de material pozzolânico (6-14%), o que lhe confere menor permeabilidade.

### 2.2. Agregado Miúdo Natural (Areia)

A areia escolhida é proveniente do Rio Paraíba e atende ao critério relacionado ao teor não inferior a 50% na soma das percentagens retidas nas peneiras ABNT nº 100 (0,15mm) e 50 (0,30mm). Esse critério é importante para propiciar melhor acabamento na superfície dos blocos pré-moldados. As amostras de areia foram secas por exposição direta ao sol e ao ar livre e depois armazenadas em tambores de concreto com tampa, protegendo-as contra a umidade.

### 2.3. Agregado Graúdo Natural (Cascalho)

O agregado graúdo utilizado trata-se de um cascalho (granítico) que foi escolhido a partir de algumas amostras obtidas nas pedreiras locais. Cuidou-se para que este material não apresentasse pó de pedra depositado na superfície das partículas, a fim de se evitar o aumento da demanda por água na mistura e o conseqüente prejuízo à resistência mecânica do concreto. Assim como a areia, o cascalho também foi seco ao sol e ao ar livre e armazenado em tambores de concreto com tampa.

### 2.4. Agregado Alternativo (Resíduos)

Os resíduos utilizados neste estudo foram provenientes de obras de edificações da cidade de Campina Grande – PB. Considerando a variabilidade do agregado de entulhos em função de sua origem (demolição, reforma ou construção), decidiu-se trabalhar apenas com resíduos de construção. Para isso, foram coletadas amostras de entulhos de edifício residencial, com 12 pavimentos, padrão “A”, cuja estrutura foi executada em concreto armado e a vedação dos vãos com tijolos cerâmicos de 8 furos, seguido de revestimento argamassado interno e revestimento cerâmico nas fachadas e áreas molhadas. Os entulhos coletados representam os

resíduos gerados na fase intermediária entre elevação de alvenaria nos pavimentos e aplicação de acabamento externo.

Para o beneficiamento dos entulhos, as amostras coletadas passaram por processo de separação de materiais indesejáveis para esta pesquisa, tais como: madeira, ferro, plástico, gesso, etc. Este estudo utilizou a alternativa mais otimizada de aproveitamento dos entulhos sem retirar a parte miúda, como forma de reduzir os custos de beneficiamento dos resíduos. O entulho foi triturado em britador de mandíbulas, que foi ajustado para se obter uma granulometria equivalente a da mistura areia-cascalho. As amostras obtidas foram secas ao ar e ao sol, e colocadas em compartimentos com tampa em ambiente fechado.

### 3. Metodologia

#### 3.1. Produção dos Blocos de Vedação

Os blocos de concreto convencionais, para primeira e segunda fase da pesquisa, foram moldados conforme os traços estabelecidos na Tabela 1.

Tabela 1: Traços estabelecidos para moldagem dos blocos convencionais.

Fase	Traço em massa (cimento:agregados)
Primeira	1:6
Segunda	1:6 e 1:8

Para confecção dos blocos de vedação alternativos foram utilizadas as proporções 30%, 60% e 100% de entulhos em substituição aos agregados naturais. A proporção entre os dois agregados naturais (areia e pedrisco) sempre permaneceu com a relação de 50%, determinada experimentalmente como a mistura mais compacta entre os agregados secos. Cada composição foi também submetida a um estudo de dosagem para obtenção da melhor relação água/cimento (a/c).

Os blocos foram moldados em máquina manual do tipo vibro-prensa, com precisão de 0,5mm. Os blocos têm dimensões 9cm x 19cm x 39cm (comprimento, largura e altura, respectivamente).

Logo após a moldagem dos blocos, eles foram colocados em câmara úmida com temperatura aproximadamente igual à 23°C e umidade relativa maior que 95%, onde permaneceram por aproximadamente 24h. Após este período, os blocos foram imersos em tanque com água, dando

continuidade ao regime de cura até as respectivas idades de controle. Neste estudo, as idades de controle escolhidas foram de 7 e 28 dias. Após a retirada dos blocos do tanque de imersão, foram capeados com uma pasta composta de cimento e água com o intuito de obter se no bloco superfícies bem planas. As superfícies planas são importantes para evitar concentração de cargas sobre o bloco durante o ensaio de resistência à compressão simples, o que traria prejuízos aos resultados.

Os blocos de vedação produzidos para cada composição e tempo de cura estudado foram submetidos aos ensaios de absorção e resistência à compressão simples de acordo com as normas da ABNT [5, 6]. As normas da ABNT [6, 7] especificam que os valores de absorção devem ser menores que 10% e os de resistência à compressão simples maiores que 2,5 MPa.

#### 3.2. Modelo da Rede Neural Artificial

A rede neural artificial (RNA) utilizada é do tipo alimentada adiante, com múltiplas camadas e treinada pelo conhecido algoritmo de retropropagação de erro [3]. Este modelo é utilizado como base para determinar a composição de blocos de vedação fabricados com entulhos provenientes da construção civil. A implementação da RNA foi elaborada através da linguagem de programação Matlab.

A arquitetura da RNA é formada por uma camada de entrada, uma oculta (ou intermediária) e uma de saída. A camada de entrada possui seis neurônios, os quais são: porcentagens de entulhos, agregado miúdo, agregado graúdo e cimento da composição; relação água/cimento; e tempo de cura. O número de neurônios na camada oculta foi determinado através de um processo baseado em tentativa-erro. Os melhores resultados foram obtidos com 10 neurônios na camada intermediária. Os valores de absorção e resistência à compressão simples são gerados pelos dois neurônios da camada de saída.

A principal importância da rede neural não é somente o modo como os neurônios são implementados, mas também como suas interconexões são feitas. Neste estudo a topologia da rede é do tipo alimentada adiante, ou seja, as conexões acontecem da camada de entrada para a camada oculta e da camada oculta para a camada de saída. As Figuras 1 e 2 ilustram a topologia do modelo da RNA e os detalhes de um neurônio, respectivamente.

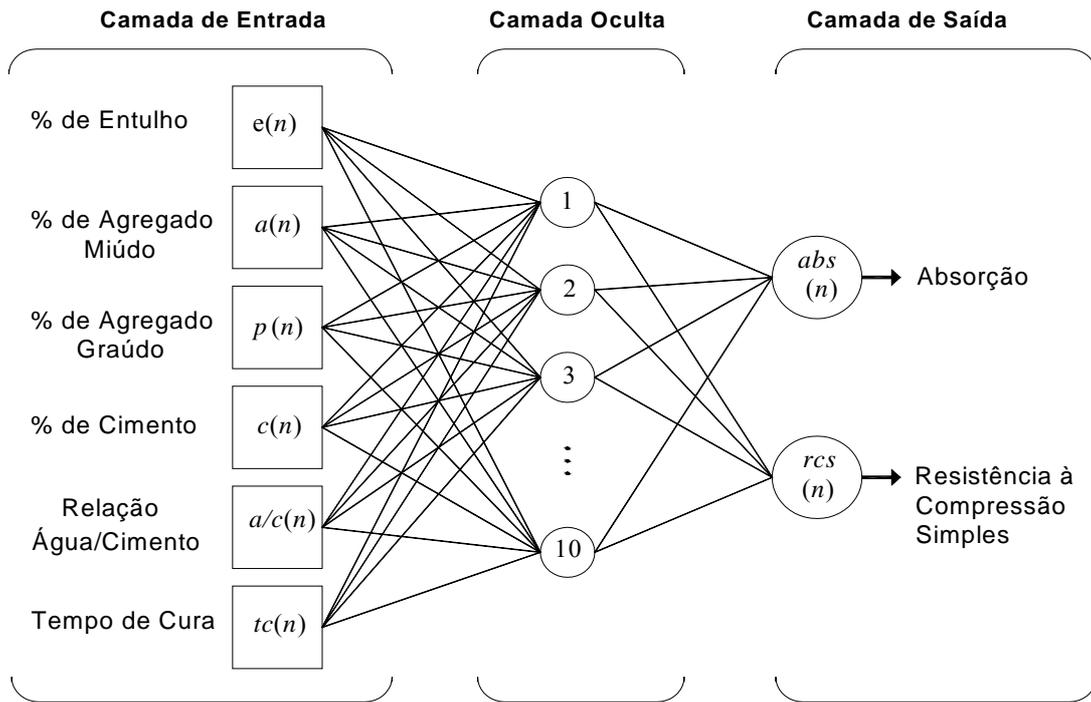


Figura 1: Topologia da rede neural artificial.

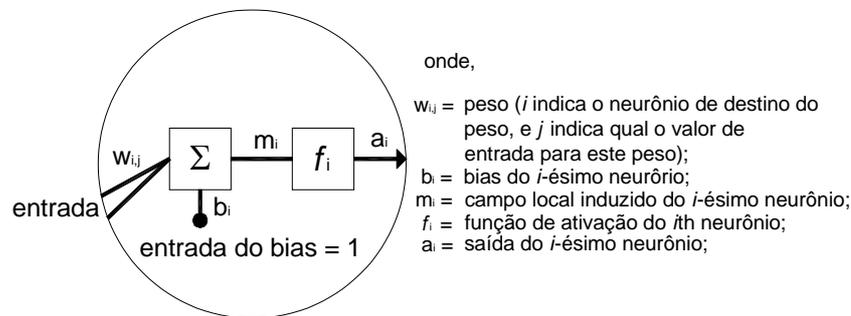


Figura 2: Detalhes de um neurônio.

Neste modelo, cada elemento do vetor de entrada é conectado com cada neurônio da camada oculta. Analisando a Figura 2, nota-se que o  $i$ -ésimo neurônio na camada oculta possui um somatório que coleta o valor de entrada multiplicado pelo peso de sua conexão ( $w_{ij}$ ) e o bias ( $b_i$ ) para formar o valor de saída ou campo local induzido ( $m_i$ ). Cada campo local induzido é submetido a uma função de ativação ( $f_i$ ) para que se torne o valor de entrada dos neurônios da camada de saída. Os dois neurônios da camada de saída possuem o mesmo esquema dos neurônios da camada oculta e seus campos locais induzidos, depois de submetidos às respectivas funções de ativação, se tornam as saídas finais da RNA, ou seja, absorção e resistência à compressão simples.

São necessárias funções diferenciáveis e contínuas para relacionar as entradas e saídas da RNA. De acordo com Haykin [3], a função sigmóide é uma boa função de ativação para cada neurônio devido ao seu comportamento geralmente aceitável. Na RNA deste estudo, a função tan-sigmóide foi utilizada como função de ativação para cada neurônio da camada oculta. Para os neurônios da camada de saída, funções lineares foram selecionadas.

O conjunto total de dados de treinamento da RNA foi de 96 blocos. Estes blocos foram classificados de acordo com os dados de entrada da RNA e geraram as seguintes categorias representadas na Tabela 2.

Tabela 2: Categoria dos dados experimentais.

Categoria	% de entulhos em substituição aos agregados naturais	Traço em massa	Traço detalhado em massa (c : a : p : e)	Relação a/c	Fase
1	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,41	1. <sup>a</sup>
2	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,49	2. <sup>a</sup>
3	0%	1:8	1,0 : 4,0 : 4,0 : 0,0	0,67	2. <sup>a</sup>
4	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,50	1. <sup>a</sup>
5	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,64	2. <sup>a</sup>
6	30%	1:8	1,0 : 2,8 : 2,8 : 2,4	0,84	2. <sup>a</sup>
7	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,58	1. <sup>a</sup>
8	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,79	2. <sup>a</sup>
9	60%	1:8	1,0 : 1,6 : 1,6 : 4,8	0,96	2. <sup>a</sup>
10	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,80	1. <sup>a</sup>
11	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,93	2. <sup>a</sup>
12	100%	1:8	1,0 : 0,0 : 0,0 : 8,0	1,20	2. <sup>a</sup>

Obs.: c = cimento; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados; a/c = relação água/cimento.

Para cada categoria da Tabela 2 foram moldadas oito amostras, quatro para cada idade de cura (7 e 28 dias), fornecendo um total de 96 amostras.

O algoritmo escolhido para o treinamento da RNA é o de retropropagação de erro, o qual tem sido utilizado com sucesso em vários campos da engenharia. O treinamento da RNA é do tipo supervisionado, ou seja, os pesos e biases entre os neurônios são ajustados através das iterações (ou épocas) com o intuito de adequar uma série de dados de entrada a outra série de respostas conhecidas.

#### 4. Resultados e Discussão

##### 4.1. Ensaio de Caracterização

###### a) Agregado Miúdo

A Tabela 3 apresenta os resultados de granulometria obtido para o agregado miúdo. De acordo com a norma da ABNT [8], a areia utilizada neste estudo apresentou diâmetro máximo ( $\Phi_{\text{máx}}$ ) igual a 2,4mm e módulo de finura (MF) igual a 2,24.

A Tabela 4 mostra os valores de massa específica e massa unitária, segundo as normas da ABNT [9, 10], da areia empregada no preparo do concreto para fabricação dos blocos de vedação.

Os valores da massa específica e da massa unitária da areia foram compatíveis com os respectivos valores de 2,60 g/cm<sup>3</sup> e 1,50 g/cm<sup>3</sup> apresentados na literatura [11]. A determinação da

massa unitária é útil, pois permite a conversão das composições de massa para volume e vice-versa [12].

A Tabela 5 apresenta os resultados de teor de torrões de argilas e de materiais pulverulentos na areia, conforme a norma da ABNT [13].

Os valores apresentados na Tabela 5 são considerados adequados, pois não ultrapassaram os valores especificados na norma da ABNT [13].

###### b) Agregado Graúdo

O ensaio de granulometria do agregado graúdo (cascalho), apresentado na Tabela 6, forneceu  $\Phi_{\text{máx}}$  igual a 9,5mm e MF igual a 5,3. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos de massa específica e massa unitária (ABNT [10, 14]) para o cascalho empregado na confecção dos blocos de concreto.

Assim como a areia, os valores da massa específica e da massa unitária do cascalho apresentaram-se bastante próximos dos respectivos valores de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e 1,40 g/cm<sup>3</sup> encontrados na literatura [11].

Tabela 3: Granulometria da areia.

Peneiras (mm)	Material retido		% que passa da amostra total
	% Amostra total	% Acumulada	
9,5	0,45	0,45	99,55
4,8	0,41	0,86	99,14
2,4	1,45	2,31	97,69
1,2	5,52	7,83	92,17
0,6	23,79	31,62	68,38
0,3	50,83	82,45	17,55
0,15	15,88	98,33	1,67
Resto	1,67	100,00	0,00

Tabela 4: Massas específica e unitária da areia.

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
2,59	1,44

Tabela 5: Teor de torrões de argila e de materiais pulverulentos na areia.

	Teor de torrões de argila (%)	Teor de material pulverulento (%)
Limite da ABNT [13]	1,50	5,00
Resultado	0,95	0,74

Tabela 6: Granulometria do cascalho.

Peneiras (mm)	Material retido		% que passa da amostra total
	% Amostra total	% Acumulada	
9,5	0,80	0,80	99,20
4,8	55,17	55,97	44,03
2,4	30,25	86,22	13,78
1,2	5,57	91,79	8,21
0,6	3,18	94,97	5,03
0,3	1,99	96,96	3,04
0,15	1,57	98,53	1,47
Resto	1,47	100,00	0,00

Tabela 7: Massas específica e unitária do cascalho.

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
2,63	1,39

## c) Agregado Alternativo

A partir da análise dos entulhos, foi possível obter sua composição gravimétrica, ilustrada na Figura 3. A Tabela 8 apresenta a granulometria obtida para os entulhos triturados. O diâmetro máximo ( $\Phi_{\text{máx}}$ ) e módulo de finura (MF) foram respectivamente 9,5mm e 3,08. A granulometria apresentada pelos entulhos não se enquadra em nenhuma classificação da norma da ABNT [13]. Neste caso, os entulhos triturados constituem-se de uma mescla de agregados graúdos e miúdos. Os valores das massas

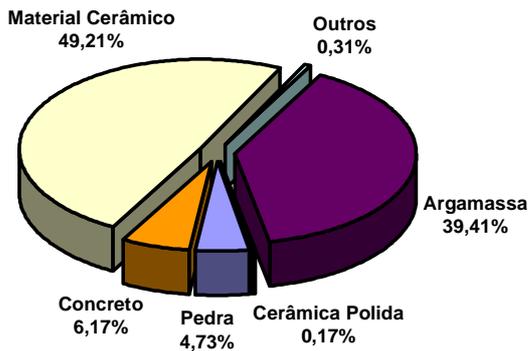


Figura 3: Composição dos entulhos estudados.

específicas e unitárias da parte graúda e miúda dos entulhos encontram-se na Tabela 9.

A massa unitária dos resíduos triturados apresentou-se menor do que a dos agregados naturais. De acordo com Leite [15], esta é uma característica que pode vir a interferir na dosagem de concretos fabricados com agregados alternativos.

## 4.2. Estudo de Dosagem

## a) Proporção entre Agregados Naturais

A Tabela 10 apresenta os valores de massa unitária no estado compactado seco (ABNT [16]) para diferentes proporções de areia e cascalho.

Uma análise da Tabela 10 mostra que a maior massa unitária e, portanto a menor quantidade de vazios, pode ser obtida com as proporções iguais a 50% para areia e 50% para cascalho.

As Tabelas 11 a 13 apresentam os valores ideais encontrados para relação água/cimento (a/c), assim como identificam as amostras dos blocos de vedação, ensaiadas nas duas fases desta pesquisa.

Tabela 8: Granulometria dos entulhos.

Peneiras (mm)	Material retido		% que passa da amostra total
	% Amostra total	% Acumulada	
9,5	2,08	2,08	97,92
4,8	15,17	17,25	82,75
2,4	14,77	32,02	67,98
1,2	11,27	43,29	56,71
0,6	13,22	56,51	43,49
0,3	14,64	71,15	28,85
0,15	17,86	89,01	10,99
Resto	10,99	100,00	0,00

Tabela 9: Massas específica e unitária dos entulhos triturados.

	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
Parte graúda dos entulhos	2,37	1,33
Parte miúda dos entulhos	2,59	1,33

Tabela 10: Determinação da melhor proporção entre os agregados naturais.

Areia (%)	Cascalho (%)	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
30	70	1,824
40	60	1,834
50	50	1,834
60	40	1,784
70	30	1,734

Tabela 11: Identificação das amostras: 1.<sup>a</sup> Fase (Traço 1:6).

Blocos de vedação – 1. <sup>a</sup> Fase (Traço 1:6)			
Traço (em massa)		1:m	
		1:6	
		1:a:p	a/c
Convencional	E0	1:3:3	0,41
	Teor de entulhos nas misturas		1:a:p:e
Alternativos	E30	30%	1:2,1:2,1:1,8
	E60	60%	1:1,2:1,2:3,6
	E100	100%	1:0,0:0,0:6,0

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

Tabela 12: Identificação das amostras: 2.<sup>a</sup> Fase (Traço 1:6).

Blocos de vedação – 2. <sup>a</sup> Fase (Traço 1:6)			
Traço (em massa)		1:m	
		1:6	
		1:a:p	a/c
Convencional	E0	1:3:3	0,49
	Teor de entulhos nas misturas		1:a:p:e
Alternativos	E30	30%	1:2,1:2,1:1,8
	E60	60%	1:1,2:1,2:3,6
	E100	100%	1:0,0:0,0:6,0

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

Tabela 13: Identificação das amostras: 2.<sup>a</sup> Fase (Traço 1:8).

Blocos de vedação – 2. <sup>a</sup> Fase (Traço 1:8)			
Traço (em massa)		1:m	
		1:8	
		1:a:p	a/c
Convencional	E0	1:4:4	0,67
	Teor de entulhos nas misturas		1:a:p:e
Alternativos	E30	30%	1:2,8:2,8:2,4
	E60	60%	1:1,6:1,6:4,8
	E100	100%	1:0,0:0,0:8,0

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

b) Relação Água/Cimento

4.3. Absorção e Resistência à Compressão Simples

As Figuras 4 a 6 apresentam os resultados de absorção e resistência à compressão simples (RCS)

dos blocos de vedação obtidos para os traços em massa 1:6 e 1:8, na primeira e segunda fase da pesquisa.

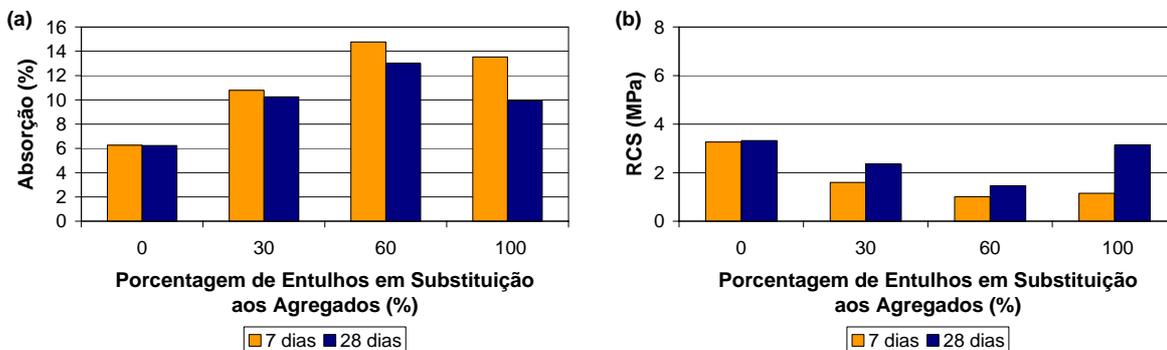


Figura 4: Resultados de (a) absorção e (b) resistência à compressão simples. 1.ª Fase (Traço 1:6)

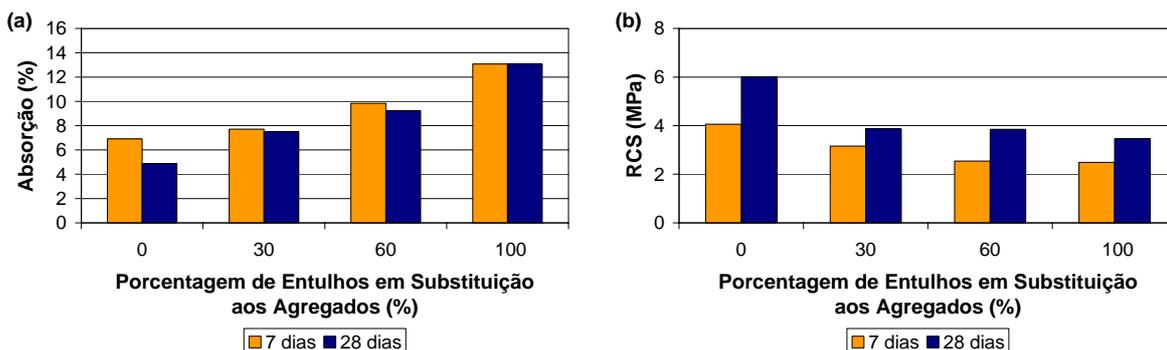


Figura 5 – Resultados de (a) absorção e (b) resistência à compressão simples. 2.ª Fase (Traço 1:6)

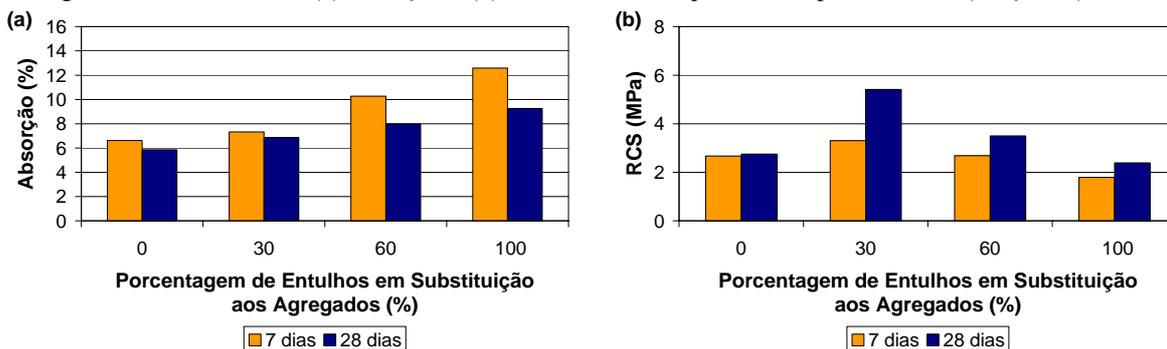


Figura 6 – Resultados de (a) absorção e (b) resistência à compressão simples. 2.ª Fase (Traço 1:8)

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4 a 6, observa-se que com o aumento do tempo de cura dos blocos, a absorção diminui e a resistência à compressão simples aumenta em todas as composições estudadas. Isto ocorre porque existe

uma tendência natural de preenchimento dos poros na microestrutura do concreto, devido à progressiva hidratação do cimento, à medida que se aumenta o tempo de cura.

A Figura 4(a) apresenta um comportamento atípico: a absorção de água do lote com 60% de entulhos é maior que a das amostras com 100%. Esperava-se que a menor quantidade de entulhos significasse menor absorção e, no entanto aconteceu o contrário. Verificou-se posteriormente que esse comportamento fora do normal deveu-se a uma falha no teor de água das misturas iniciais realizadas na primeira fase.

Comparando-se os resultados do traço 1:6 na primeira e segunda fase, pode-se destacar que, apesar do aumento da relação a/c nesta última, não foi observado crescimento no valor de absorção de água ou diminuição na resistência à compressão simples, pelo contrário, estas propriedades melhoraram. Acredita-se que isto se deve ao melhor adensamento fornecido pela máquina de moldagem devido ao acréscimo de água nas amostras da segunda fase. Para fornecer o adensamento ideal ao bloco é necessário adicionar água suficiente para suprir as reações químicas do cimento, a trabalhabilidade, a absorção dos agregados naturais (de pouca significância) e a absorção dos entulhos.

Quanto aos blocos moldados na primeira fase, observa-se que os lotes com 30% e 60% de entulhos incorporados não apresentaram absorção em acordo com as exigências da norma da ABNT [7] (Absorção < 10%). Entretanto, todos os lotes produzidos na segunda fase mostraram resultados de absorção aceitáveis pela norma, com exceção das amostras com traço 1:6 e 100% de entulhos incorporados.

Observando a Figura 4(b), nota-se que os blocos alternativos, nas idades de 7 e 28 dias, não atingem o valor mínimo de 2,5MPa para resistência à compressão (valor exigido pela norma da ABNT [6]).

Analisando os lotes da primeira fase (Figura 4), observa-se uma redução da resistência à compressão na medida em que há um aumento do teor de entulhos incorporados nas composições com 30% e 60% de entulhos. Os lotes com 100% de entulhos destacam-se por apresentar resistência à compressão simples quase igual à do bloco convencional na idade de 28 dias. Percebe-se que este foi o único caso em

que parece ter ocorrido a correção do teor de água na mistura (relação a/c=0,80) para compensar a alta absorção de água por parte dos entulhos. Levando-se em consideração este comportamento atípico da amostra da primeira fase com 100% de entulhos incorporados, foram realizados novos ensaios com o objetivo de se obter as relações a/c ideais para cada composição estudada, o que resultou a segunda fase deste trabalho.

Observações das composições de traço 1:6 na segunda fase (Figura 5), mostram que houve crescimento da resistência à compressão com o aumento do tempo de cura, o que era esperado. Existiu também uma redução da resistência na medida em que houve o aumento do teor de entulhos incorporados nas composições. Já o traço 1:8 da segunda fase (Figura 6) apresenta um comportamento diferenciado dos demais traços, uma vez que houve um acréscimo da resistência à compressão simples com o aumento do teor de entulhos, decrescendo após um determinado ponto.

De forma geral, todos os blocos alternativos estudados na segunda fase atenderam ao valor mínimo especificado pela norma da ABNT [6].

O bom desempenho mecânico de alguns blocos alternativos em comparação com os blocos convencionais provavelmente é decorrente do bom arranjo entre as partículas dos materiais componentes combinado com o uso de uma relação a/c adequada.

#### 4.4. Redes Neurais Artificiais

Para implementação da RNA, foram utilizados todos os resultados experimentais obtidos na primeira e segunda fase. A seguir são mostrados os gráficos de correlação entre os resultados produzidos pela RNA (gerados a partir dos valores de entrada dos exemplos de treinamento) e os dados de saída conhecidos. Na Figura 7 encontram-se os gráficos de correlação para os dados de absorção e resistência à compressão simples (RCS), respectivamente.

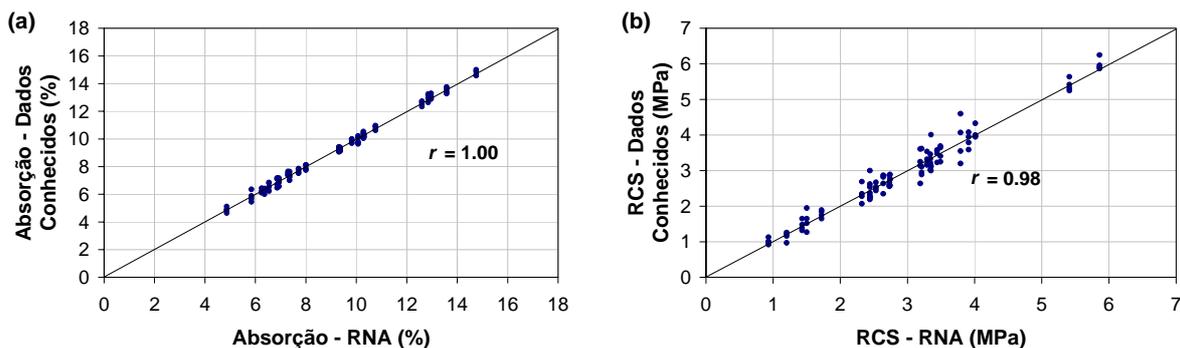


Figura 7: Correlação entre os resultados de (a) absorção e (b) resistência à compressão simples produzidos pela RNA versus os dados conhecidos.

A correlação obtida para os dados de absorção e resistência à compressão simples foi respectivamente 100% e 98%. Estes resultados revelam a ótima precisão alcançada pela RNA treinada.

a) Validação do modelo

Para validar o funcionamento do modelo da RNA, foram treinadas 12 novas RNAs, onde cada uma excluía uma diferente categoria dos dados experimentais (exibidos na Tabela 2) para realização do treinamento.

Após a elaboração de cada RNA, a categoria que não participou do treinamento foi utilizada como novo dado de entrada e, portanto desconhecido pela RNA em questão. Os resultados gerados pelas 12 RNAs foram então comparados com os dados de absorção e resistência à compressão simples conhecidos. As Figuras 8 e 9 apresentam um comparativo entre os resultados teóricos (RNAs) e experimentais (resultado real) de absorção e resistência a compressão simples (RCS), com 7 e 28 dias de cura, para cada categoria estudada.

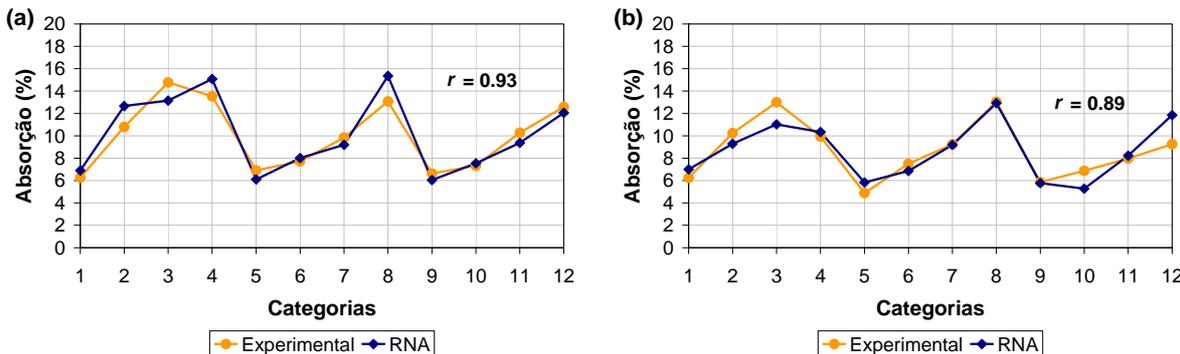


Figura 8 – Validação dos resultados de absorção com (a) 7 e (b) 28 dias de cura

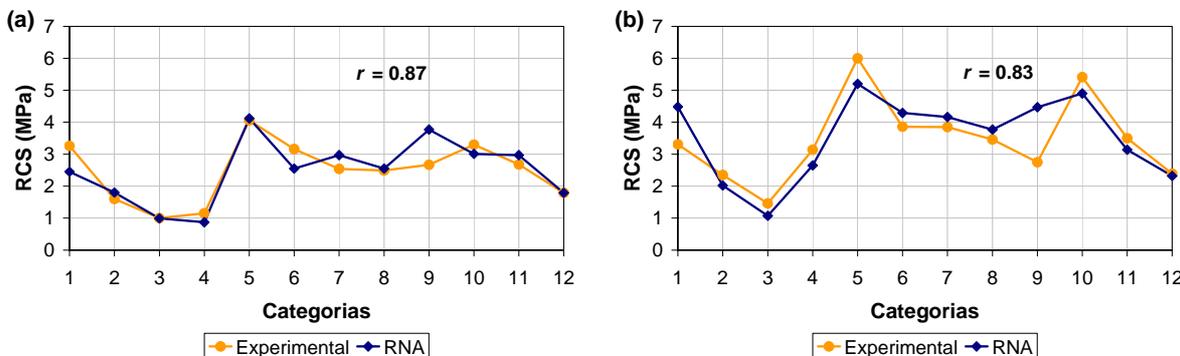


Figura 9 – Validação dos resultados de resistência à compressão simples com (a) 7 e (b) 28 dias de cura.

Observando os resultados apresentados pelas Figuras 8 e 9, vê-se que apesar de não ter conhecimento algum sobre uma dada categoria, as RNAs conseguem produzir valores bem próximos dos observados experimentalmente. Isto mostra o quanto elas são interessantes quando se trata de estabelecer modelos não-lineares e extrair complexas tendências. Como resultado, espera-se que este modelo de RNA possa informar quais são as prováveis melhores e piores composições experimentais, e assim indicar a execução ou não-execução de experimentos.

## 5. Conclusões

Através deste trabalho foi possível constatar a confiabilidade técnica de blocos de vedação produzidos a partir de entulhos da construção civil. Os resultados experimentais obtidos colaboram mostrando que é possível a reciclagem de resíduos para produção de componentes utilizáveis em obras urbanas, minimizando vários problemas ambientais assim como o desperdício do setor construtivo. Este estudo também investigou o uso de redes neurais artificiais (RNAs) para definição de um modelo capaz de prever a eficiência de dosagens desconhecidas para blocos de vedação de concreto. O modelo produziu valores de resistência à compressão simples e absorção a partir de dados de composição desconhecidos pela RNA e apresentou índices de confiabilidade bastante satisfatórios. Neste intento, acredita-se que este modelo possa reduzir o tempo e os gastos com experimentos durante a determinação da composição ideal de tais blocos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Rede de Catalise Norte/Nordeste – RECAT e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## Referências

- [1] Cincotto, M. A. Mineração e mecanismo de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociência da USP, São Paulo, 1989.
- [2] Farias, C. A. S., Carvalho, J. B. Q. Avaliação do desempenho de blocos estruturais de concreto fabricados com entulho da construção civil. Relatório de Estágio Supervisionado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.
- [3] Haykin, S. Neural networks: a comprehensive foundation. 2.<sup>a</sup> ed. Prentice Hall: New Jersey, 1999.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Cimento Portland composto, NBR 11578 (1991).
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria com função estrutural – Método de ensaio, NBR 7186, 1982.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Blocos vazados de concreto simples – Determinação da resistência à compressão, NBR 7184, 1991.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural – Especificação, NBR 6136, 1994.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Determinação da composição granulométrica dos agregados, NBR 7217, 1982.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Método de ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo – Frasco de Chapman, NBR 9776, 1987.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária em estado solto – Método de ensaio, NBR 7251, 1982.
- [11] Petrucci, E. G. R. Concreto de cimento Portland, 13<sup>a</sup> ed., rev. por PAULON, V. A., Editora Globo, São Paulo, 1998.
- [12] Bauer, E., Costa, R. A., Oliveira, S. J. Geração de parâmetros de referência para controle de recebimento de agregados para argamassa de revestimento. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados para concreto, NBR 7211, 1987.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo. Método de ensaio, NBR 9937, 1987.
- [15] Leite, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária – Método de ensaio, NBR 7810, 1983.