

## **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA DE AGLOMERANTE ALTERNATIVO UTILIZANDO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL SIMPLEX**

E. Dering<sup>1</sup>, D. Fachini, J. A. Cerri<sup>2</sup>, M. S. de Araújo<sup>1</sup>  
Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900, Campo Comprido, Curitiba, PR - Brasil,  
81210110, eduardo.dering@gmail.com

<sup>1</sup>Departamento Acadêmico de Mecânica - UTFPR, <sup>2</sup>Departamento Acadêmico de  
Construção Civil / Mestrado em Engenharia Civil - UTFPR

### **RESUMO**

*O excesso de resíduos e subprodutos gerados em todas as etapas da construção civil e os altos índices de emissão de gases poluentes provocam grande impacto ambiental. A minimização da geração de resíduos e a criação de técnicas para seu reaproveitamento são diretrizes intrínsecas aos conceitos de construção civil verde e sustentabilidade. Dentre os resíduos de construção e demolição (RCD), os provenientes de blocos cerâmicos e telhas (fração vermelha) ainda têm aplicações restritas. Porém, a fração vermelha é composta por silicatos e, com uma correta seleção, se torna um material pulverulento que pode reagir com a cal, juntamente com a sílica ativa, formando compostos com características comparáveis às do cimento Portland. Esse trabalho avalia a resistência mecânica à compressão e a absorção de água para a formulação de um aglomerante alternativo pela substituição parcial do cimento Portland CP-V por fração vermelha, cal e sílica ativa, utilizando um delineamento experimental simplex.*

Palavras-chave: aglomerante alternativo, resíduos de construção e demolição, cimento Portland, ativação alcalina.

### **INTRODUÇÃO**

A reciclagem e a reutilização de subprodutos e resíduos na construção civil são diretrizes para redução de custos e, principalmente, minimização do impacto ambiental nesse setor industrial. A utilização de materiais alternativos e o desenvolvimento de novas técnicas de produção são mudanças estritamente

necessárias para a melhoria do setor nos aspectos técnicos, econômicos e ambientais<sup>(1)</sup>.

Aglomerante é um material ligante, pulverulento, utilizado na obtenção das pastas, argamassas e concretos, que promove a união entre os grãos do material inerte<sup>(2)</sup>. Se, devido a sua composição química e reatividade em meio aquoso um resíduo apresentar condições favoráveis ao endurecimento, este poderá ser utilizado como aglomerante. O aglomerante mais utilizado atualmente é o cimento Portland, uma vez que esse material possui facilidade de obtenção de matéria-prima e bom desempenho mecânico. Porém, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberado para a atmosfera durante a extração e produção do cimento Portland chega a corresponder a 5% da emissão global<sup>(3)</sup>.

Atualmente, os estudos sobre o potencial de emprego dos RCD têm se concentrado principalmente no desenvolvimento de agregados reciclados, na produção de argamassas e estruturas de concreto. Blocos cerâmicos têm bons resultados para aplicação em argamassas, enquanto resíduos de concreto apresentam melhores resultados como agregados reciclados para a produção de concretos<sup>(4)</sup>. Contudo, uma vez que haja uma correta seleção e reciclagem da fração vermelha do RCD, esta se torna um material pulverulento e reativo que, em condições adequadas, pode reagir com a cal e promover a formação de um novo composto com características comparáveis às do cimento Portland. Isso é possível pela ativação alcalina da fração vermelha, rica em silicatos e aluminatos. A cal, que apresenta elevada alcalinidade, é empregada em sistemas onde o cimento é substituído por adições minerais, provendo Ca(OH)<sub>2</sub>. Com a adição da sílica, constituída de partículas muito finas e elevada superfície específica, pode-se controlar a formação dos aluminossilicatos. O objetivo deste trabalho é avaliar, por meio de ensaios de resistência mecânica à compressão e determinação da absorção de água, a influência da substituição parcial do cimento CP-V ARI por cal, sílica ativa e fração vermelha de RCD.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### Materiais

O cimento Portland escolhido para a aplicação foi o CP-V ARI, de alta resistência inicial, pois é um tipo de cimento que não apresenta adições. O CP-V

ARI foi doado pela Cia de Cimento Itambé, de Balsa Nova - PR, e foi utilizado como recebido. A Tabela 1 apresenta uma caracterização fornecida pelo fabricante do CP-V ARI.

Tabela 1 - Características do cimento CP-V ARI.

Característica	Valor
Superfície específica BET (m <sup>2</sup> /g)	6,806
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,097
Finura (peneira # 200 - 0,075 mm) (%)	≤8,0
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3000
Tempo de início de pega (h)	≥1
Tempo de fim de pega (h)	≤10
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥34

A cal utilizada foi a cal virgem CaO 200, doada pela Cal Hidra Ltda, de Almirante Tamandaré - PR. Esse tipo de cal virgem é mais reativa e apresenta granulometria mais refinada, passante na malha nº 200 (0,075 mm), de acordo com a ABNT.

A sílica ativa disponível para o estudo foi a microssílica SILMIX, fabricada por Globe Metais Indústria e Comércio S.A., de Breu Branco - PA, sendo algumas características físicas e químicas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características da sílica ativa.

Característica	Valor
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,22
Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	20
Diâmetro médio (µm)	0,2
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	≥85
Umidade (%)	≤3
Equivalente alcalino (%)	≤0,5

A fração vermelha utilizada foi doada pela Usina de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição da empresa Ponta Grossa Ambiental, de Ponta Grossa - PR. A fração vermelha foi moída em moinho de bolas, peneirada e somente a parte passante em malha nº 200 (0,075 mm) foi utilizada nos ensaios.

Para a produção dos corpos de prova, foi utilizada a areia padrão IPT e água proveniente da rede de distribuição da SANEPAR (NBR 7215/1996)<sup>(5)</sup>. Para a moldagem das composições com adição de superplastificante, foi utilizado um plastificante de polímeros policarboxilatos MC-PowerFlow 1180, da empresa MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda, doado pela empresa Diprotec

(Distribuidora de Produtos Técnicos para Construção Civil Ltda, de Curitiba - PR). A Tabela 3 apresenta as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3 - Dados técnicos do aditivo superplastificante.

Característica	Valor
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,09±0,02
pH	6,7
Teor de cloretos (%)	< 0,1
Teor de álcalis (%)	< 1,0

### Métodos

O planejamento experimental foi elaborado por meio da utilização de uma modelagem de misturas tipo simplex quadrática, com resultados apresentados e analisados na forma de gráficos de superfícies de resposta. Para isso, foram definidos 7 pontos experimentais de composições. A quantidade de cimento CP-V ARI foi fixada em 30% em massa e então foram definidas as composições de cal, fração vermelha e sílica ativa com teor de substituição de 70% em massa de cimento Portland em relação a composição referência (denominada Referência). A Tabela 4 apresenta as composições estudadas. As amostras de sílica ativa, cal, cimento CP-V ARI, e a fração vermelha, todas passantes em peneira nº 200, foram analisadas quanto à superfície específica (Quantachrome, Nova 1200) e massa específica (Quantachrome Ultrapicnômetro 1000) no Laboratório de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, PR.

Tabela 4 - Composições estudadas e seus respectivos percentuais em massa.

Amostra	Composição das Misturas (%)				
	Código	Cal	Sílica	Fração Vermelha	CP-V ARI
2	C47S23FV0CPV30	46,6	23,4	0,0	30
3	C70S0FV0CPV30	70,0	0,0	0,0	30
5	C23S47FV0CPV30	23,4	46,6	0,0	30
9	C23S23FV23CPV30	23,3	23,3	23,3	30
11	C23S0FV47CPV30	23,4	0,0	46,6	30
13	C47S0FV23CPV30	46,6	0,0	23,4	30
17	C38S16FV16CPV30	38	16	16	30
Referência	C0S0FV0CPV100	0,0	0,0	0,0	100

A quantidade de água utilizada para moldagem dos corpos de prova seguiu três métodos diferentes. Primeiramente, foi determinado o teor de água para obter a pasta de consistência normal, segundo norma NBR NM 43/2003<sup>(6)</sup> (método I). O

método II baseou-se na mesa de abatimento para determinação da argamassa padrão (NBR 7215/2003)<sup>(5)</sup>, ajustando-se a quantidade de água necessária para que todas as composições tivessem abatimento igual ou próximo ao apresentado pela Referência. De modo complementar, para o método III, foi adicionado à quantidade de água obtida no ensaio da pasta de consistência normal, o aditivo superplastificante. A quantidade adicionada foi a necessária para que as composições atingissem o valor de abatimento da Referência.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram até a idade de 7 dias em cura por imersão em água saturada com cal. A caracterização da resistência mecânica à compressão axial foi realizada por ensaio de acordo com a NBR 7215/1996, sendo obtidas as resistências médias com 7 corpos de prova cada composição. A avaliação da absorção de água foi realizada de acordo com a NBR 9778/2005<sup>(7)</sup>, por meio de 3 corpos de prova por composição.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de massa e área específica das matérias-primas utilizadas são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Massa e área específica dos materiais utilizados.

Amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Área específica (m <sup>2</sup> /g)
Sílica ativa	2,2706	16,9226
Cal	2,4486	9,8845
Cimento CP-V ARI	3,0968	6,8060
Fração vermelha	2,6451	11,3100

A partir dos resultados, a modelagem de misturas simplex quadrática foi elaborada utilizando software de análise estatística Statistica 10 - StatSoft. As superfícies de resposta aplicando os métodos I, II e III são apresentadas nas Figuras 1 à 3. As Equações A à F representam o modelo de misturas quadrático, em que “R.M.C.” representa a variável dependente resistência mecânica à compressão axial, “A.A.” é a variável dependente absorção de água, “C” é a variável cal, “S” é a variável sílica e “FV” é a variável fração vermelha, além da combinação dessas três variáveis presentes no polinômio de 2º grau.

$$\text{R.M.C. (I)} = 2,69 C + 13,66 S + 3,72 FV + 11,83 CS + 1,11 CFV + 24,45 SFV \quad (\text{A})$$

$$\text{A.A. (I)} = 9,86 C + 7,39 S + 10,14 FV + 0,89CS - 2,37 CFV - 11,24 SFV \quad (\text{B})$$

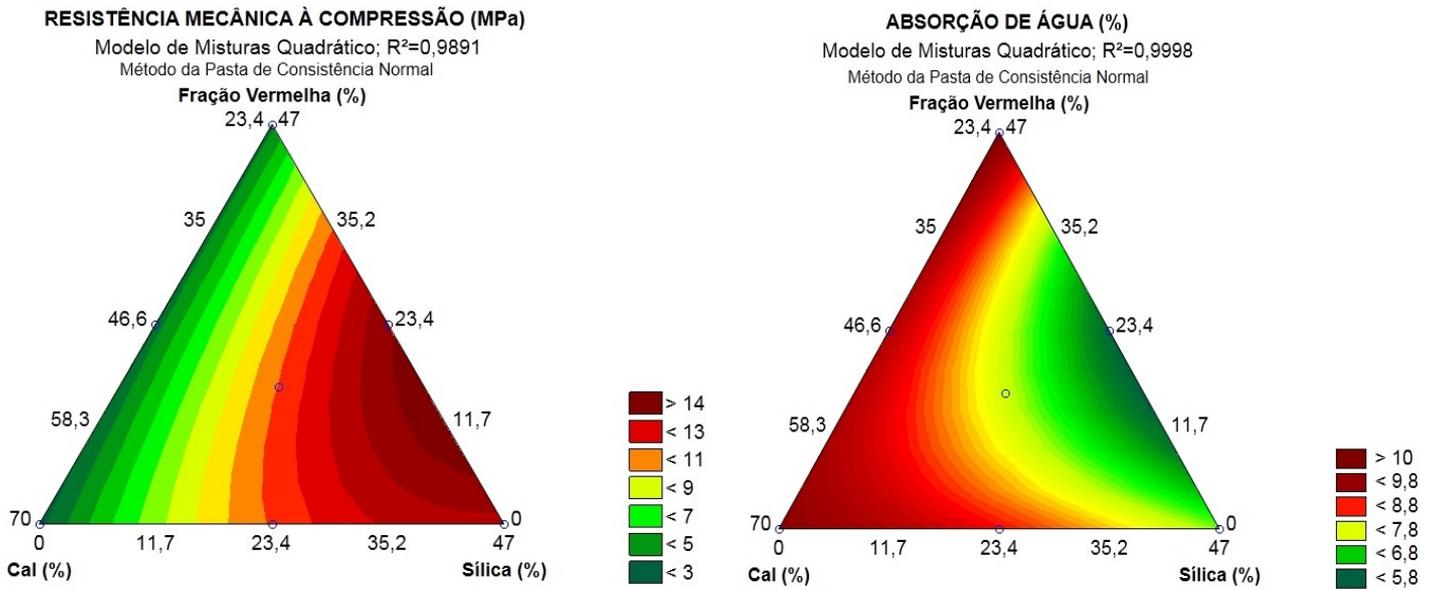


Figura 1 - Resistência à compressão e absorção de água aos 7 dias - método I.

$$R.M.C. (II) = 3,22 C + 4,90 S + 3,71 FV + 9,08 CS - 0,74 CFV + 17,05 SFV \quad (C)$$

$$A.A. (II) = 11,88C + 8,97S + 12,24 FV - 1,33 CS - 0,29 CFV - 7,49 SFV \quad (D)$$

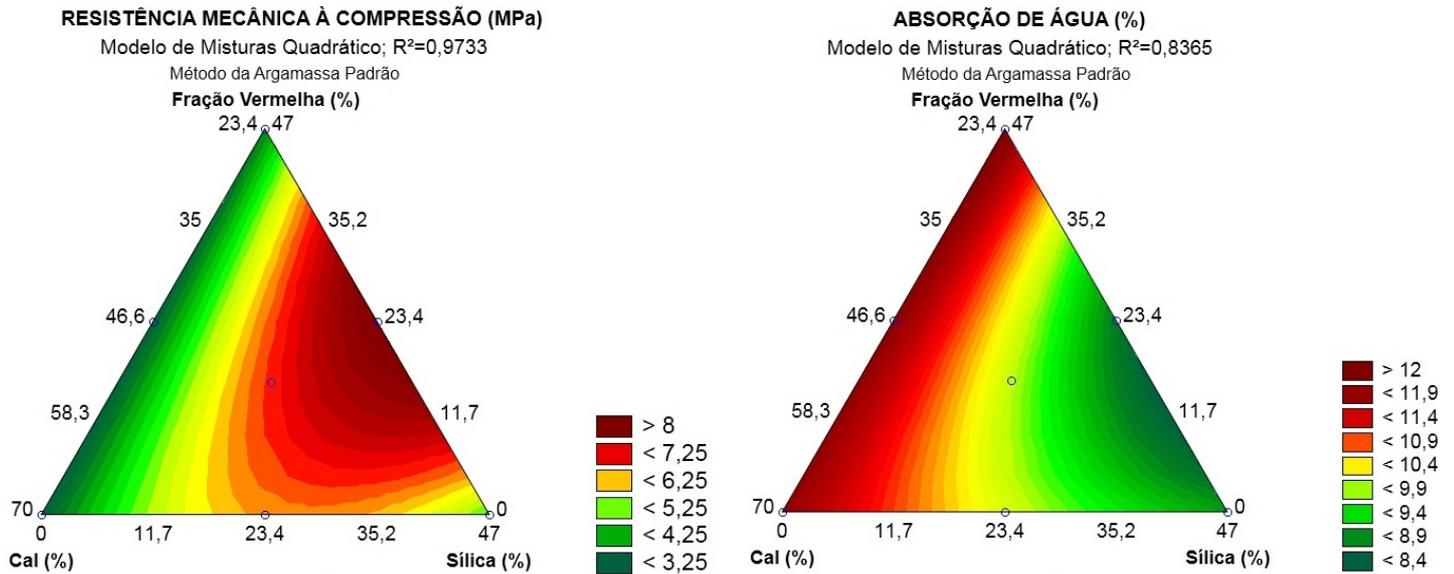


Figura 2 - Resistência à compressão e absorção de água aos 7 dias - método II.

$$R.M.C. (III) = 9,62 C + 5,22 S + 14,21 FV + 29,59 CS + 1,65 CFV + 13,76 SFV \quad (E)$$

$$A.A. (III) = 7,03C + 11,49 S + 5,73 FV - 16,11 CS - 0,75 CFV - 6,68 SFV \quad (F)$$

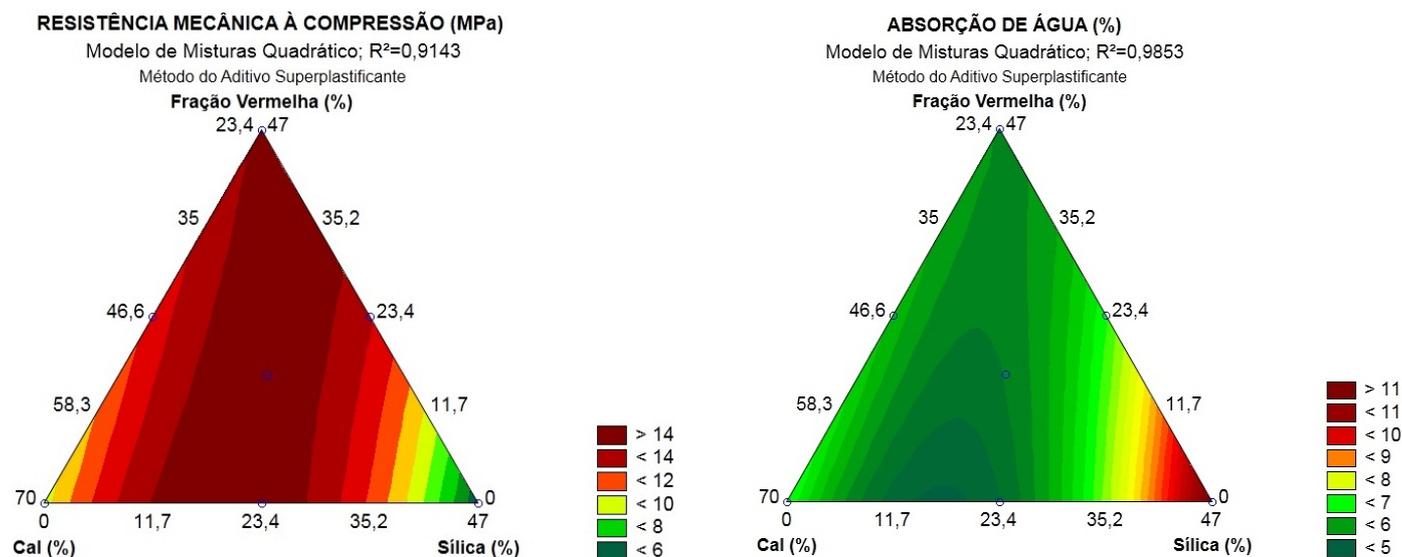


Figura 3 - Resistência à compressão e absorção de água aos 7 dias - método III.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que para o método I, o qual necessitou de menores relações água/aglomerante, obteve-se melhores resultados de resistência mecânica à compressão e absorção de água nas composições que combinam os três componentes, como a composição 9, na aresta do triângulo entre a fração vermelha e a sílica ativa. O comportamento das curvas assemelha-se às pelo método II. Contudo, o excesso de água adicionado no método II contribuiu negativamente para a resistência mecânica à compressão e absorção de água. Com a utilização do superplastificante no método III, foram obtidos os valores mais altos de resistência à compressão e os menores para absorção de água e observa-se que as composições na região central do triângulo são as que obtêm os melhores resultados. Nota-se que a combinação cal e sílica ativa é determinante para o desempenho mecânico e absorção de água das composições estudadas. Sugere-se um estudo da evolução dos compostos mineralógicos formados por difratometria de raios-X ao longo do tempo, utilizando-se diferentes ativadores alcalinos e técnicas de cura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas PIBITI e DT, a Cia. de Cimentos Itambé, a Cal Hidra, a Empresa Ponta Grossa Ambiental e a Diprotec pelas matérias-primas fornecidas.

## REFERÊNCIAS

1. FACHINI, D. **Aglomerante alternativo para construção civil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 110p.
2. TARTUCE, R.; GIOVANETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto de cimento Portland**. São Paulo: PINI: IBRACON, 1990. 107 p.
3. PACHECO T.F., CASTRO-GOMES J.P., JALAI S. - **Ligantes geopoliméricos: Uma alternativa ambiental ao cimento Portland no contexto da economia do carbono**. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/4590>. Acessado em 10/08/2011.
4. ÂNGULO, S. C. **Produção de concretos de agregados reciclados**. 1998. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 1998, 84 p.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro, 1997. 8p.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 43: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2003. 14p.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005. 8p.

## EVALUATION OF MECHANICAL COMPRESSION STRENGTH AND WATER ABSORPTION OF AN ALTERNATIVE BINDER USING SIMPLEX EXPERIMENTAL DESIGN

### ABSTRACT

The excess waste and byproducts generated at all stages of construction and the high indices of greenhouse gas emissions causes large environmental impact. The minimization of waste generation and creation of reuse techniques are guidelines to the concepts of green building and sustainability. From among the construction and demolition waste (CDW), the clayed ceramic bricks (red fraction) still have restricted applications. However, the red fraction is composed of silicates and can become a powdery material which can react with lime, along with silica fume, to form compounds with comparable characteristics to those in Portland cement. This paper evaluates the mechanical strength and water absorption for the formulation of an alternative binder by ordinary Portland cement substitution for red fraction, lime and silica fume using a simplex experimental design.

Key-words: alternative binder, construction and demolition waste, Portland cement, alkaline activation.