



SICITE

XVII SEMINÁRIO
DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
E TECNOLÓGICA DA UTFPR

COMPORTAMENTO MECÂNICO E FORMAÇÃO DE FASES DE AGLOMERANTE ALTERNATIVO PARA USO EM BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADO PARA PAVIMENTAÇÃO

Eduardo Dering¹, Márcia Silva de Araújo¹, José Alberto Cerri²

¹ Departamento Acadêmico de Mecânica - DAMEC

² Departamento Acadêmico de Construção Civil / Pós-Graduação em Engenharia Civil

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900, Campo Comprido, Curitiba / PR - Brasil, CEP 81.210-110

eduardo.dering@gmail.com, araujo@utfpr.edu.br, cerri@utfpr.edu.br

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, como a fração vermelha é composta por silicatos, com um processamento adequado torna-se um material pulverulento que pode reagir com cal, juntamente com a sílica ativa, formando compostos com características aglomerantes 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 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.

Abstract - The excess waste and byproducts generated at all stages of building industries and the high rates of greenhouse gas emissions causes large environmental impact. The minimization of waste and development of reuse techniques are guidelines to the reach concepts like green building and sustainability. Components of the construction and demolition waste (CDW), the ceramic bricks and tiles (red portion) still have restricted applications. However, the red portion is composed of silicates and with an appropriate process becomes a powdery material which can react with lime and silica fume to originate compounds of comparable binders characteristics to those in Portland cement. This paper evaluates the compression strength and water absorption for the mortars composition of an alternative binder by Portland cement partial substitution for red portion, lime and silica fume using a simplex experimental design.

Key-words: Alternative binder; Construction and demolition waste; Portland cement; Alkaline activation.

INTRODUÇÃO

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

estritamente necessárias para a melhoria do setor nos aspectos técnicos, econômicos e ambientais [1].

Aglomerante é um material ligante, pulverulento, utilizado na obtenção das pastas, argamassas e concretos, que promove a união entre os grãos do material inerte [2]. Caso a composição química e reatividade em meio aquoso de 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 dióxido de carbono liberado para a atmosfera durante a extração e produção do cimento Portland chega a corresponder a 5% da emissão global [3]. Estima-se que para cada 1000 kg de cimento Portland produzido, 550 kg de CO₂ são liberados para a atmosfera, além de 390 kg emitidos pela queima de combustíveis fósseis consumidos durante a produção [3].

Atualmente, os estudos sobre o potencial de emprego dos resíduos na construção civil têm se concentrado principalmente no desenvolvimento de agregados reciclados, na produção de argamassas e estruturas de concreto. As pesquisas mostram que resíduos de blocos cerâmicos têm bons resultados para aplicação em argamassas, enquanto resíduos de concreto apresentam melhores resultados como agregados reciclados para a produção de concreto [4].

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 que são comparadas às do cimento Portland. Isso é possível pela ativação alcalina da fração vermelha, rica em silicatos e aluminatos. A cal, que em solução aquosa apresenta elevada alcalinidade, é empregada em sistemas onde o cimento é substituído por adições minerais, fornecendo hidróxido de cálcio para o sistema. Com a adição da sílica, constituída de partículas muito finas e grande área superficial, 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 Portland CP-V ARI por cal, sílica ativa e fração vermelha do resíduo de construção e demolição.

METODOLOGIA

Materiais. O cimento Portland escolhido para a aplicação é o CP-V ARI, de alta resistência inicial, pois é um tipo de cimento que não apresenta adições. Esse cimento foi doado pela Cia de Cimento Itambé, de Balsa Nova / PR, e foi utilizado como recebido. A Tabela 1 apresenta características do CP-V ARI fornecidas pelo fabricante.

Tabela 1. Características do cimento CP-V ARI.

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

Foi utilizada uma 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 fina, passante na malha ABNT nº 200 (0,075 mm).

A sílica ativa utilizada (SILMIX) foi adquirida da Globe Metais Indústria e Comércio S.A., de Breu Branco / PA. Algumas características físicas e químicas da sílica ativa fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características da sílica ativa.

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

A fração vermelha foi doada pela usina de reciclagem de entulho da empresa Ponta Grossa Ambiental, de Ponta Grossa / PR. A fração vermelha foi moída em moinho de bolas e peneirada, a parte passante em malha ABNT nº 200 foi utilizada para os ensaios.

Para a produção dos corpos de prova de argamassa, foi utilizada a areia padrão IPT e água proveniente da rede de distribuição da SANEPAR. Para a moldagem das composições com adição de aditivo, foi utilizado um superplastificante a base de policarboxilatos (MC-PowerFlow 1180) doado pela MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda. A Tabela 3 apresenta algumas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3. Dados técnicos do superplastificante.

Característica	Valor
Massa específica (g/cm ³)	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 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% e então foram definidas as composições com cal, fração vermelha e sílica ativa, com teores de substituição de 70% em massa de aglomerante. 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 ABNT nº 200, foram analisadas quanto à área específica (Quantachrome, Nova 1200) e massa específica (Quantachrome Ultrapicnômetro 1000) no Laboratório de Materiais da UEPG.

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 (método I) [5]. Para o método II a determinação da argamassa padrão foi baseada nos resultados previstos da NBR 7215/2003 em uma mesa de abatimento (*Flow Table*), ajustando-se a quantidade de água necessária para que todas as composições tivessem abatimento igual ou próximo ao apresentado pela composição referência [6]. De modo complementar para o método III utilizou-se o teor de

água obtida no ensaio da pasta de consistência normal para adicionar o aditivo superplastificante na quantidade necessária para que a composição atingisse o valor de abatimento da composição referência. Na Tabela 4 são mostradas as composições estudadas.

Tabela 4. Percentuais em massa das composições.

Amostra	Composição das Misturas (% em massa)				
	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	38,0	16,0	16,0	30
Referência	C0S0FV0CPV100	0,0	0,0	0,0	100

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram até a idade de 7 dias em cura por imersão em água saturada com cal. A execução dos ensaios de resistência mecânica à compressão axial seguiu as prescrições da NBR 7215/1996, sendo avaliados 7 corpos de prova. A avaliação da absorção de água seguiu as prescrições da NBR 9778/2005, sendo avaliados 3 corpos de prova [7].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade e área específica. Os valores de densidade e área específica das matérias-primas utilizadas são apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Densidade e área específica dos materiais utilizados.

Amostra	Massa específica (g/cm ³)	Área específica (m ² /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

Relação água/aglomerante. Os valores das relações água/aglomerante e o percentual em massa de aditivo superplastificante em relação à massa de aglomerante são apresentados na Tabela 6. Analisando os valores obtidos, é possível afirmar que o método I admitiu as menores quantidades de água para obtenção das amostras. Porém, a trabalhabilidade de algumas composições ficou comprometida pela mínima quantidade de água de amassamento disponível no sistema. O método II, argamassa de abatimento padrão, obteve maiores relações água/aglomerante e todas as relações superaram a apresentada pela composição Referência, para um abatimento igual ou próximo. Nota-se que as composições com predominância da cal exigiram as maiores quantidades de água, pois esse componente tem grande capacidade de absorção de água para hidratação. Argamassas extremamente secas foram obtidas utilizando o método I, resultando em amostras com pouca capacidade de adensamento ou compactação. Composições com maiores quantidades de fração vermelha de RCD apresentaram as maiores

quantidades de aditivo superplastificante para atingirem abatimentos próximos aos da referência.

Tabela 6. Relações água/aglomerante e quantidade percentual de aditivo utilizados nos três métodos de obtenção dos corpos de prova.

Amostra	Água/ aglomerante - método I	Água/ aglomerante - método II	Abatimento <i>flow table</i> - II (mm)	Aditivo - método III (%)	Abatimento <i>flow table</i> - III (mm)
2	0,56	0,73	180	0,60	180
3	0,47	0,71	180	1,40	180
5	0,76	0,82	179	0,25	181
9	0,49	0,67	180	0,69	184
11	0,30	0,56	181	10,63	179
13	0,35	0,66	184	10,70	180
17	0,50	0,65	182	0,57	182
Ref.	0,48	0,48	182	-	-

Resistência mecânica à compressão e absorção de água. A partir dos resultados da Tabela 6, a modelagem de misturas simplex quadrática foi elaborada utilizando software de análise estatística Statistica 10 - StatSoft. As superfícies de respostas aplicando os métodos I, II e III são apresentadas nas Figuras 1, 2 e 3. As equações 1 à 6 representam o modelo quadrático de misturas, em que “R.M.C.” representa a variável dependente resistência mecânica à compressão, “A.A.” representa a variável dependente absorção de água, “C” é a variável cal, “S” é a variável sílica e “FV” é a variável fração vermelha e, as combinações dessas três variáveis também estão presentes no polinômio de 2º grau.

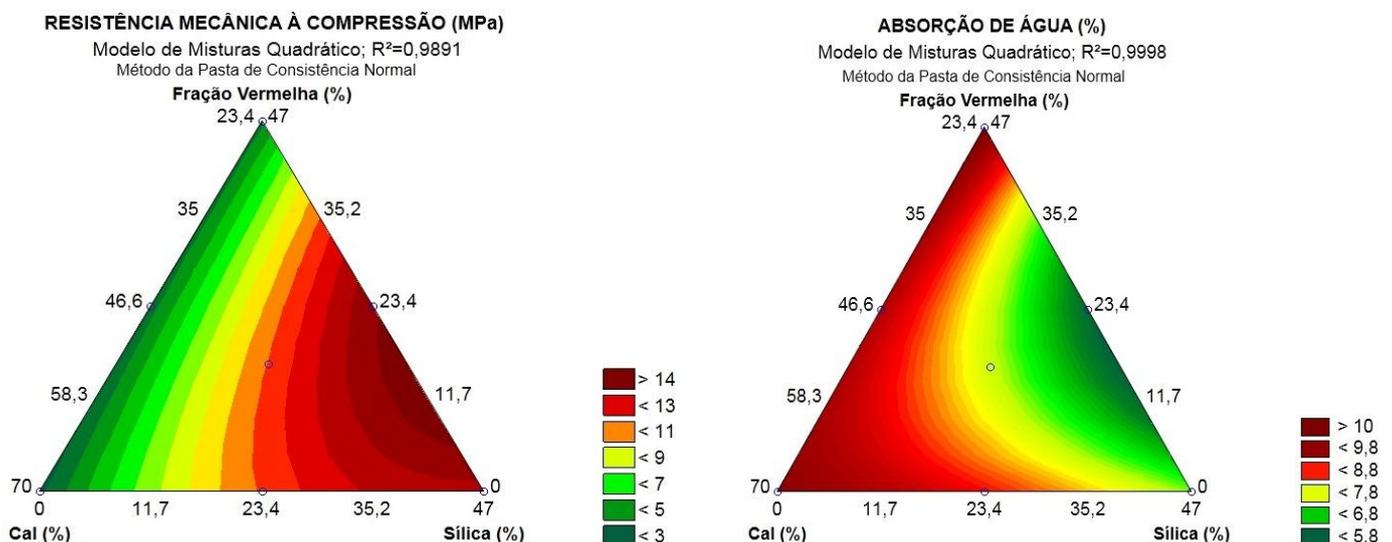


Figura 1. Resistência à compressão e absorção de água aos 7 dias - método I.

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

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

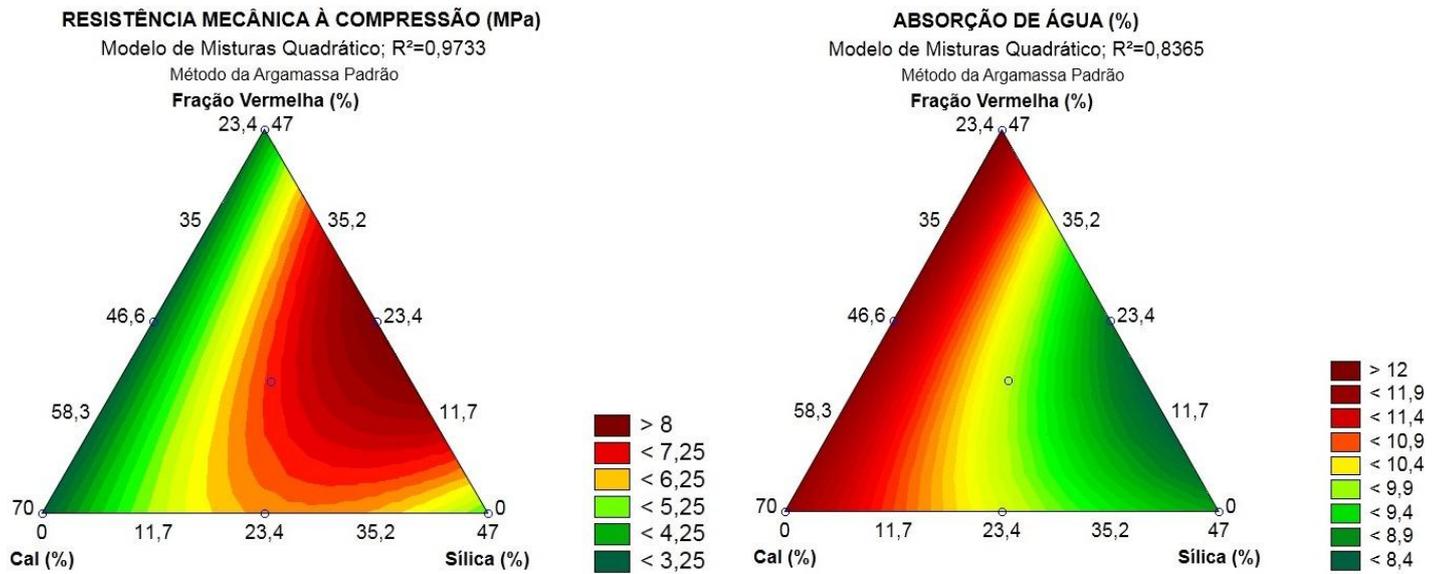


Figura 2. Resistência à compressão e absorção de água aos 7 dias - método II.

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

$$A.A. (II) = 11,88C + 8,97S + 12,24FV - 1,33CS - 0,29CFV - 7,49SFV \quad (4)$$

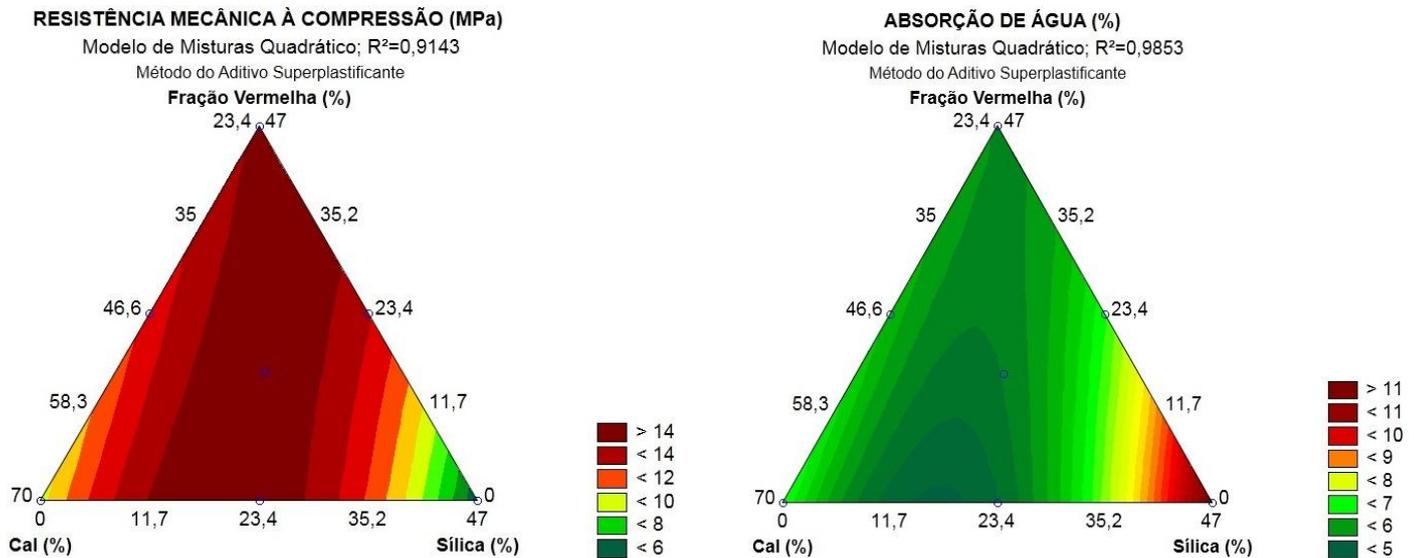


Figura 3. Resistência à compressão e absorção de água aos 7 dias - método III.

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

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

Os resultados do método I, os quais necessitaram de menores relações água/aglomerante, obtiveram os melhores resultados de resistência mecânica à compressão e absorção de água nas composições que combinam os três componentes, como a composição 9, no lado do triângulo entre a fração vermelha e a sílica ativa. O comportamento da curva

permaneceu similar no método III. Contudo, o excesso de água no sistema contribuiu negativamente para a resistência mecânica à compressão e absorção de água. Com a utilização do superplastificante, foram obtidos os maiores valores de resistência à compressão e os menores para absorção de água. No método III, o comportamento da curva mudou e pode-se observar que composições na região central do triângulo são as que obtêm os melhores resultados. De modo geral, percebe-se que a combinação entre cal e sílica ativa são determinantes para o desempenho mecânico e absorção de água das composições estudadas. Sugere-se estudo da evolução dos compostos e fases formadas pela análise química por difração de raios-X ao longo do tempo. O estudo de diferentes técnicas de cura e seus efeitos sobre o desempenho mecânico das composições também é recomendado.

CONCLUSÕES

Avaliando os resultados obtidos a partir da metodologia aplicada é possível concluir que:

- a sílica ativa, fração vermelha e cal, em ordem decrescente, apresentam áreas específicas superiores às do cimento Portland;
- o cimento Portland CP-V ARI apresenta maior massa específica, seguido da fração vermelha, cal e sílica ativa. A porosidade das partículas cerâmicas da fração vermelha de RCD explica a alta área específica e uma massa específica menor se comparada à do CP-V ARI;
- a metodologia aplicada mostrou-se adequada para as características avaliadas, as superfícies de resposta e equações obtidas representam corretamente o comportamento do sistema;
- os métodos de obtenção da quantidade de água e trabalhabilidade necessária para produção das argamassas mostraram-se consistentes, porém deve-se ainda estudar meios de encontrar uma ótima quantidade de água, com ou sem o auxílio de aditivos. As composições com relações água/aglomerante mais elevadas mostraram menores valores de resistência à compressão e maiores valores de absorção de água;
- composições com combinação dos 3 componentes (9 e 17) mostraram maiores valores de resistência mecânica à compressão e menores valores de absorção de água. Porém, as maiores resistências mecânicas atingidas aos 7 dias não passaram dos 16 MPa, enquanto a composição referência atingiu quase 31Mpa;
- a ocorrência de reação geopolimérica ainda não pode ser evidenciada. A identificação da ativação alcalina no sistema deve ser analisada futuramente com a utilização de mais métodos de caracterização química e de cinética de reações, levando-se em consideração as relações molares Si/Al, Ca/Si e Ca/Al para a formulação de novas composições para avaliação das propriedades mecânicas;
- sugere-se o acompanhamento da formação e evolução dos compostos com o auxílio de ensaio de difração de raios-X para avaliar o potencial aglomerante das composições estudadas;
- sugere-se o uso de diferentes métodos de cura como, por exemplo, a cura a vapor em autoclave, para posterior avaliação da estrutura química e propriedades mecânicas das composições mais promissoras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) e as de DT, a Cia. de Cimentos Itambé, a Cal Hidra, a

Empresa Ponta Grossa Ambiental e a empresa Diprotec por meio do Tecnólogo Kirke Moreira Wrubel, pelas matérias-primas doadas.

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 NM 43: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 14p.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8p.
- [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.