

CARACTERIZAÇÃO DE AGLOMERANTE ECOLÓGICO PARA ARGAMASSAS OBTIDO A PARTIR DA RECICLAGEM DE ESCÓRIA DE FORNO PANELA

Marinho, A.B.(1); Santos, C.M.(1); Carvalho, J.F.(1,2,*); Fontes, W.C.(1);

Matias, A. C. P. (1); Brigolini, G. J. (1); Peixoto, R.A.F.(1)

(1) Departamento de Eng. Civil - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP);

(2) Departamento de Eng. Civil - Universidade Federal de Viçosa (UFV);

(*) Laboratório de Materiais de Construção Civil – UFOP, Morro do cruzeiro,
35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais. E-mail: josemaria.carvalho@ufv.br

RESUMO

Um aglomerante sustentável obtido da reciclagem da escória de forno panela (EFP) foi produzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP a partir de amostras provenientes do município de Piracicaba, São Paulo. Foi realizado um trabalho de caracterização desse material, cujos resultados são apresentados. As características físicas, químicas e mineralógicas foram obtidas empregando-se, dentre outras, as técnicas de granulometria por difração de laser, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) com refinamento Rietveld, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A análise química mostrou presença predominante de CaO e SiO₂; a análise mineralógica apontou presença de fase amorfa e predominância de cálcio-olivina, mervinita e piroxeno e; as imagens geradas mostraram predominância de grãos angulosos e alongados. Com base nos resultados, o material foi classificado como aglomerante hidráulico, com características compatíveis às de cales hidráulicas comerciais.

Palavras chave: escória de forno panela, aglomerante sustentável, aglomerante hidráulico; argamassa sustentável; caracterização de ligante.

INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental está relacionada com o consumo excessivo e ineficiente dos recursos naturais não renováveis ⁽¹⁾. Neste contexto, a indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de matérias primas minerais e contribui de maneira importante com a degradação ambiental ⁽²⁾.

No processo de produção do aço, uma grande quantidade de subprodutos é gerada. Somente no Brasil, em 2013 foram produzidas 17,7 milhões de toneladas de resíduos, sendo que destes, entre 0,7 e 1,3 milhões de toneladas foram de EFP ⁽³⁾.

A EFP é um subproduto da indústria siderúrgica, obtida no processo de refinamento secundário na produção de aço de baixo carbono ⁽⁴⁾ e é comumente disposta em aterros e pátios de armazenamento, causando impactos ambientais ⁽⁵⁾. Esse material é gerado em um processo de resfriamento lento e apresenta grande quantidade de material pulverulento ⁽⁶⁾⁽⁷⁾, porém sua composição mineralógica favorece o desenvolvimento de propriedades cimentícias de interesse para o setor de construção ⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. As EFP são compostas, principalmente, de cálcio, silício, magnésio, óxidos de alumínio e silicatos de cálcio em diferentes formas alotrópicas, e avaliações ambientais indicam que se trata de um resíduo não perigoso ⁽⁹⁾.

Vários pesquisadores vêm estudando as propriedades das EFP em diferentes aplicações como: estabilizante para solos ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾; matéria prima para produção de clínquer ⁽¹³⁾; materiais de enchimento e agregados miúdos em misturas asfálticas ⁽¹⁴⁾; ligantes para argamassas ⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾; adição em produtos cerâmicos ⁽¹⁸⁾ e matéria prima para produção de geopolímeros ⁽¹⁹⁾.

No Brasil, a utilização de alvenarias revestidas, tanto nos fechamentos quanto em divisórias internas de edifícios de baixo e médio padrão, é muito comum. Nesses edifícios, o custo dos materiais empregados na produção das matrizes cimentícias gira em torno dos 20% do custo total ⁽²⁰⁾⁽²¹⁾. Adicionalmente, a qualidade das argamassas de assentamento e revestimento empregadas nestes edifícios são importantes na garantia do bom desempenho da edificação e de sua vida útil ⁽²²⁾.

As argamassas mistas de cal e cimento apresentam boa trabalhabilidade e acabamento, o que contribui com a redução do custo de mão de obra e com o aumento da qualidade na construção ⁽²³⁾. A combinação da pega aérea e hidráulica

permite, ainda, o desenvolvimento de características adaptadas para diferentes substratos ⁽²⁴⁾.

Um amplo estudo de caracterização de um aglomerante hidráulico, produzido a partir do processamento de uma EFP no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP, foi realizado, e os resultados foram confrontados com os de ligantes comerciais comumente utilizados em argamassas mistas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Foram utilizadas no estudo, uma cal hidratada (CA) tipo CHI, conforme prescrições da NBR 7175 ⁽²⁵⁾ e uma cal hidráulica (CH) tipo HL2, conforme especificações da EM 459-1 ⁽²⁶⁾.

O aglomerante sustentável (AS) foi produzido a partir de uma EFP proveniente de Piracicaba, São Paulo. Foram coletadas amostras representativas da escória de forno panela bruta (EFPB), conforme prescrições da NBR 10007 ⁽²⁷⁾ e este material foi processado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP (LMCC/UFOP). O processamento básico empregado consistiu em moagem e separação de frações por peneiramento.

Todos os materiais foram armazenados em recipientes hermeticamente fechados para conservação de suas propriedades ao longo da pesquisa.

Produção do aglomerante sustentável

Os processos empregados na produção do AS foram moagem e separação da fração metálica. O processo de separação magnética foi aplicado na escória de forno panela processada usando um rolo magnético INBRAS®, pertencente ao LMCC/UFOP, com intensidade de campo de 950 Gauss. A moagem foi feita em um moinho de bolas de baixa eficiência MARCONI MA500 ® utilizando-se bolas de aço inoxidável. Os tempos de moagem foram ajustados com base na obtenção de distribuição granulométrica desejada.

Caracterização dos ligantes

Os três ligantes foram caracterizados e suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas foram obtidas.

Foi aplicada a técnica de difração de laser para obtenção da distribuição granulométrica dos ligantes, empregando-se um equipamento BETTERSIZ 2000®, pertencente ao LMCC/UFOP. A morfologia foi verificada por meio de imagens de microscopia ótica, empregando uma lupa estereoscópica Oleman 26600®, pertencente ao LMCC/UFOP, com ampliação de 45x; e imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), empregando-se o equipamento TESCAN Vega3 SEM®, de propriedade do Laboratório de Microscopia Eletrônica da Escola de Minas, UFOP (NanoLab). As outras propriedades físicas obtidas foram o teor de umidade, massa específica e massa unitária, determinadas conforme metodologias normalizadas NBR9939 ⁽²⁸⁾, NBR NM 23 ⁽²⁹⁾ e NBR NM 45 ⁽³⁰⁾, utilizando-se os equipamentos disponíveis no LMCC/UFOP.

A composição química foi obtida empregando-se a técnica de fluorescência de raios X (FRX) utilizando-se o equipamento Shimadzu Rayny EDX 720®, pertencente ao NanoLab. Adicionalmente, foram obtidas composições químicas pontuais em áreas específicas das amostras submetidas à MEV por meio de espectrômetro de energia dispersiva acoplado ao microscópio.

De posse dos resultados da análise química, o índice de hidraulicidade foi calculado aplicando-se a equação (A). Na Tabela 1 são apresentadas as faixas de classificação de ligantes quanto ao índice de hidraulicidade.

$$i = \frac{\%SiO_2 + \%Fe_2O_3 + \%Al_2O_3}{\%CaO + \%MgO} \quad (A)$$

Tabela 1. Classificação de aglomerantes hidráulicos ⁽³¹⁾

Ligante	i
Cal aérea	0.00 <i< 0.10
Fracamente hidráulico	0.10 <i< 0.16
Medianamente hidráulico	0.16 <i< 0.31
Hidráulico padrão	0.31 <i< 0.42
Fortemente hidráulico	0.42 <i< 0.50

A caracterização mineralógica foi feita empregando-se a técnica de difração de raios X (DRX), utilizando-se um equipamento Panalytical Empyrean®, pertencente ao Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Geologia da UFOP. O equipamento foi configurado com radiação CuK α , tensão de 45 kV,

intensidade de corrente de 40mA, velocidade angular de 0,02, 20 segundos por passo e faixa angular de 4° a 80°. Para uma análise quantitativa das fases amorfas e dos compostos mineralógicos principais foi empregada a técnica de refinamento de Rietveld. Para tanto foram utilizados fluorita e anatase como padrões internos.

RESUSTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do AS foi ajustada por meio de moagem com o intuito de aumentar a área específica e a reatividade ⁽³²⁾. Os aglomerantes comerciais CA e CH tiveram suas curvas granulométricas determinadas, e estas serviram de balizamento para a obtenção da curva granulométrica do AS por meio de ajustes no tempo de moagem. As curvas granulométricas da EFPB e dos aglomerantes estudados são apresentadas na Figura 1.

Os resultados mostram um ajuste satisfatório da granulometria, ficando a curva de distribuição granulométrica do AS muito próxima à curva apresentada pela CH.

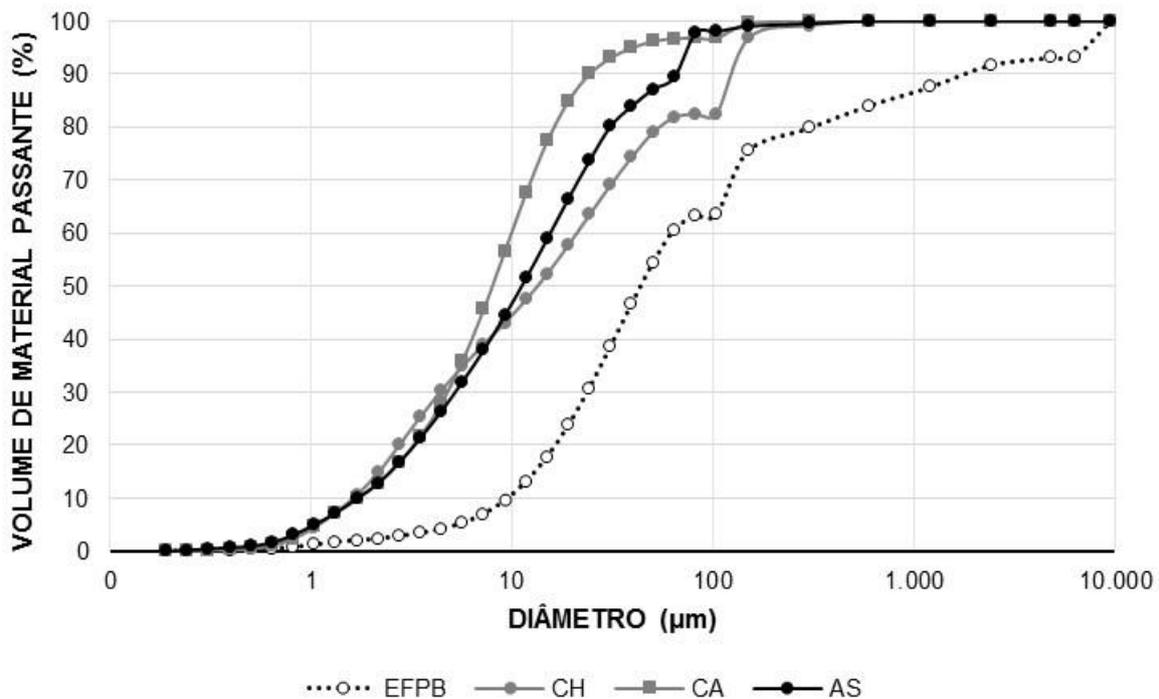


Figura 1. Distribuição granulométrica dos aglomerantes e da EFPB

Massa específica, massa unitária e teor de umidade

O AS apresentou um valor elevado de umidade comparado aos outros aglomerantes testados. As massas específica e unitária do AE também foram superiores, devido à composição química deste. Os resultados são apresentados na Figura 2.

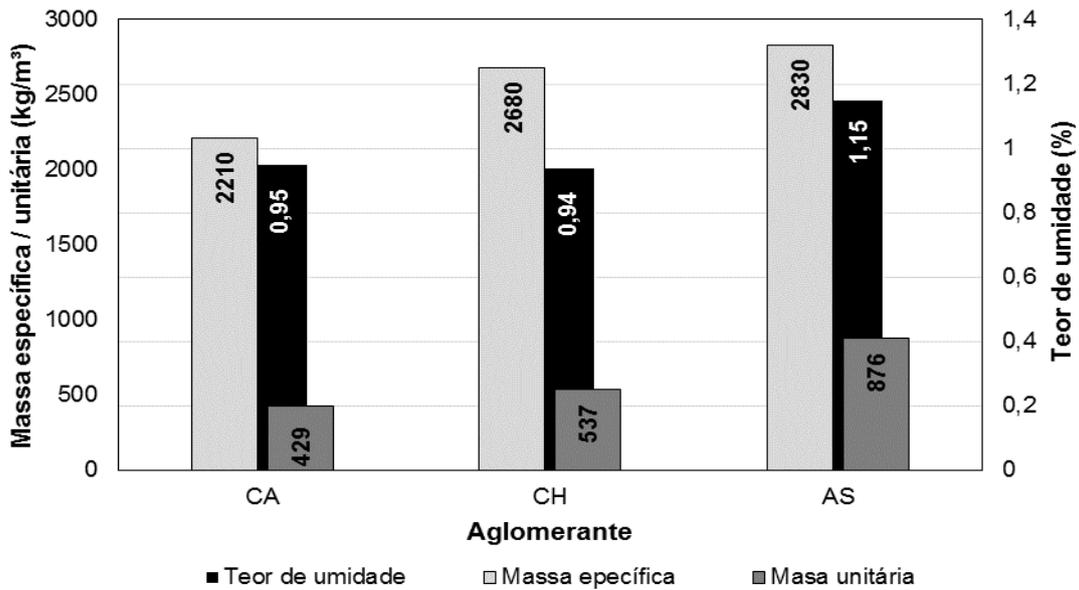


Figura 2. Massa específica, massa unitária e teor de umidade dos aglomerantes

Caracterização química e mineralógica

Os resultados da caracterização química estão apresentados na Tabela 2 e estão em concordância com dados reportados pela literatura ⁽⁶⁾⁽³²⁾.

Tabela 2. Resultados da FRX em óxidos para os aglomerantes estudados.

Óxido	AS	CH	CA
CaO	60.0%	36.5%	96.0%
SiO ₂	26.9%	21.5%	1.9%
SrO	0.2%	0.1%	0.6%
SO ₃	5.2%	0.6%	0.6%
K ₂ O	-	1.8%	0.5%
Fe ₂ O ₃	1.2%	1.0%	0.2%
MgO	6.2%	30.7%	-
Al ₂ O ₃	-	7.3%	-
ZrO ₂	-	0.2%	-
TiO ₂	0.4%	0.2%	-
MnO	0.5%	-	-

A partir dos resultados da FRX, os índices de hidraulicidade foram calculados e são apresentados na Tabela 3. Os resultados obtidos para os aglomerantes comerciais são concordantes com o esperado. O AS apresentou índice de hidraulicidade 0,44, o que o classifica como aglomerante fortemente hidráulico.

Tabela 3. Índices de hidraulicidade calculados e classificação dos aglomerantes.

Aglomerante	i
AS	0,42 (fortemente hidráulico)
CH	0,44 (fortemente hidráulico)
CA	0.03 (cal aérea)

Os difratogramas obtidos revelam que o AS apresenta predominância de cálcio-olivina, merwinita e fase amorfa, o que concorda com a literatura ⁽⁸⁾. Adicionalmente, os dados mostram presença de compostos cimentantes como silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. Compostos expansíveis indesejáveis (CaO e MgO) estão associados com silicatos e hidratos e podem ser considerados estáveis. Os resultados das análises mineralógicas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados da análise mineralógica dos aglomerantes.

Mineral	Fórmula química	Símbolo	%		
			AS	CH	CA
Anatase	TiO ₂	A	5,0*		
Brucita	Mg(OH) ₂	B		16,6	
Cálcio-olivina	Ca ₂ SiO ₄	Ca	43,2		
Calcita	CaCO ₃	C		2,5	7,9
Fluorita	CaF ₂	F	1,0	10,0*	10,0*
Larnita	βCa ₂ SiO ₄	L	4,0		
Mayenita	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	Ma	1,7		
Merwinita	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	Me	10,9		
Montmorilonita	(Na,Ca) _{0,33} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O	Mo	2,6		
Muscovita	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	M		5,6	
Periclásio	MgO	Pe	3,6	6,3	
Piroxeno	Si ₂ O ₆ CaMg	Pi	8,2		
Portlandita	Ca(OH) ₂	P		33,5	65,4
Quartzo	SiO ₂	Q		10,8	
Wollastonita	CaSiO ₃	W	2,5		
Fase amorfa			17,3	14,7	16,7

*padrão interno

Morfologia

As imagens de microscopia ótica permitiram verificar o aspecto das partículas dos aglomerantes e contribuíram no ajuste do processo de moagem do AS, na busca de materiais com características físicas similares.

As imagens de MEV mostram que a CA é composta predominantemente por partículas de menor diâmetro, conforme observado na análise granulométrica. As partículas dos aglomerantes AS e CH apresentam similaridades em sua morfologia, sendo compostos por grãos predominantemente angulares. As partículas de AS, no entanto, são predominantemente alongadas enquanto as de CH são predominantemente volumétricas. As imagens de microscopia ótica e de MEV são apresentadas na Figura 3.

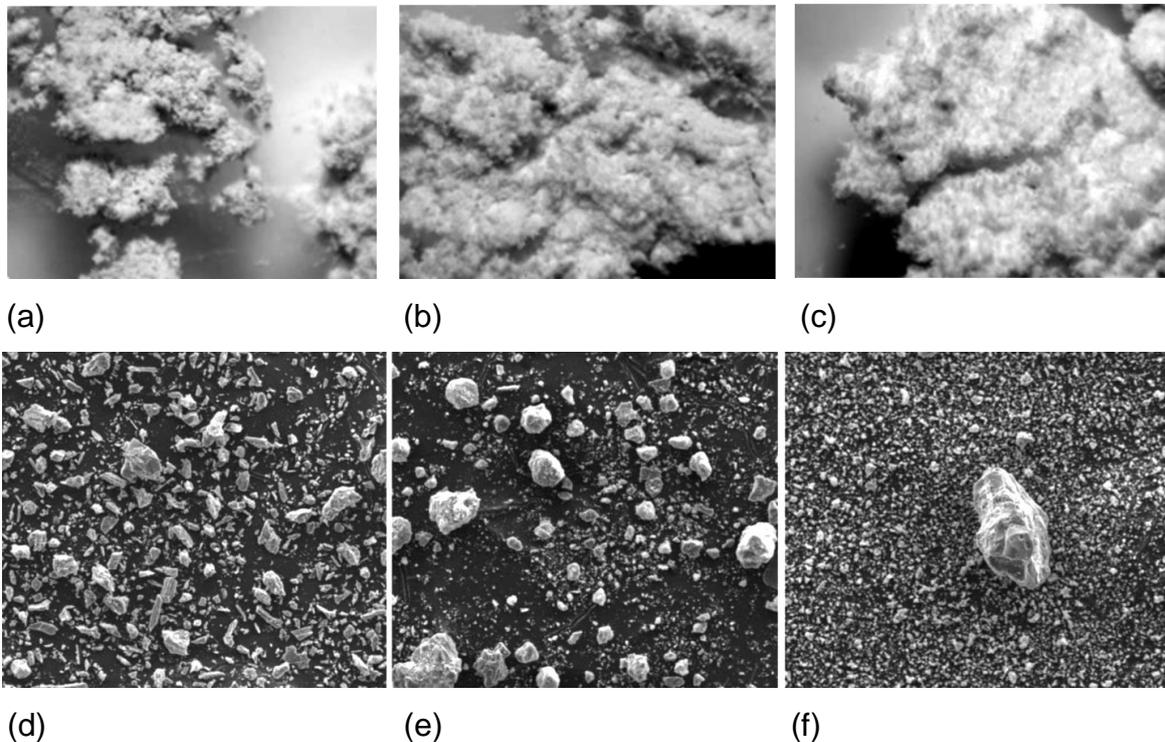


Figura 3. (a) Imagem de microscopia ótica do AS; (b) imagem de microscopia ótica da CH; (c) imagem de microscopia ótica da CA; (d) imagem de MEV do AS; (e) imagem de MEV da CH; (f) imagem de MEV da CA.

CONCLUSÕES

O método de processamento da EFP para produção do AS apresentou-se satisfatório e o material obtido possui granulometria e morfologia similares à da CH.

A composição mineralógica mostra presença considerável de aluminatos e silicatos de cálcio e a composição química mostrou predominância de Ca, Si e Mg, assim como a CH testada. O índice de hidraulicidade obtido foi igual a 0,44, ligeiramente superior ao obtido pela CH. Dessa forma, o AS é classificado como fortemente hidráulico, com características físicas, químicas e morfológicas compatíveis com a CH.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências CAPES, CNPq, FAPEMIG e Fundação Gorceix pelo suporte financeiro. Agradecem, também, o Laboratório de Microscopia Eletrônica / Redemat / Escola de Minas / UFOP (NanoLab) e o Laboratório de Difração de raios X / Degeo / UFOP pelos equipamentos utilizados e suporte técnico. Os autores agradecem, ainda, o Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos RECICLOS – CNPq, pela infraestrutura e colaboração.

REFERÊNCIAS

- (1) LEITE, M. B. Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição, 2001, 290p., Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia - UFRGS, Porto Alegre.
- (2) JOHN, V. M. (2003). Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, São Paulo, SP, 2003. Anais... São Paulo, EPUSP-PCC/ANTAC, 2003, p. 47-63.
- (3) INSTITUTO AÇO BRASIL (IaBr). Relatório de Sustentabilidade 2014. Rio de Janeiro, 2013, 49p.
- (4) MANSO, J. M.; LOSAÑEZ, M.; POLANCO, J. A.; GONZALEZ, J. J. Ladle Furnace Slag in Construction. Journal of Materials in Civil Engineering, v.17, p.513-518, 2005.
- (5) RODRIGUEZ, A., MANSO, J. M., ARAGÓN, A., GONZALES, J. J. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. Resources, Conservation & Recycling, v. 53(11), p.645-651, 2009.
- (6) SHI, C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. Cement and Concrete Research, v. 32, p. 459-462, 2002.

- (7) BRANCA, T. A., COLLA, V., & VALENTINI, R. A way to reduce environmental impact of ladle furnace slag. *Ironmaking & Steelmaking*, v.36(8), p.597-602. 2009.
- (8) SETIÉN J.; HERNÁNDEZ D.; GONZÁLEZ, J.J. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 1788–1794, 2009.
- (9) RADENOVIC, A., MALINA, J., SOFILIC, T., SORRELL, C. Characterization of ladle furnace slag from carbon steel production as a potential adsorbent. *Advances in Materials Sciences and Engineering*, v.2013, 6p., 2013.
- (10) HERRERO, T., VEGAS, I. J., SANTAMARÍA, A., SAN-JOSÉ, J. T., SKAF, M. Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. *Construction and Building Materials*, v.123, p.404-413, 2016.
- (11) MANSO, J. M., ORTEGA-LÓPEZ, V., POLANCO, J. A., SETIÉN, J. The use of ladle-furnace slag in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, v.40, p.126-134, 2013.
- (12) ORTEGA-LÓPEZ, V., MANSO, J. M., CUESTA, I. I., GONZÁLEZ, J. J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil stabilization applications. *Construction and Building Materials*, v.68, p.455-464, 2014.
- (13) SÁEZ-DE-GUINOA VILAPLANA, A., FERREIRA, V. J., LÓPEZ-SABIRÓN, A. M., ARANDA-USÓN, A., LAUSÍN-GONZÁLEZ, C., BERGANZA-CONDE, C., FERREIRA, G. Utilization of ladle furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. *Construction and Building Materials*, v.94, p.837-843, 2015.
- (14) SKAF, M., ORTEGA-LÓPEZ, V., FUENTE-ALONSO, J. A., SANTAMARÍA, A., MANSO, J. M. Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, v.122, p.488-495, 2016.
- (15) MANSO, J. M.; RODRIGUEZ, A.; ARAGÓN, A.; GONZALEZ, J. J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. *Construction and Building Materials*, v.25, 3508-3519, 2011.
- (16) MARINHO, A. L. B., Aglomerante ecológico para argamassa – Reciclagem da escória de forno panela, 2015, 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto.

- (17) BANTSIS, G., SIKALIDIS, C., BETSIU, M., YIOUTSIS, T., BOURLIVA, A. Ceramic building materials for electromagnetic interference shielding using metallurgical slags. *Advances in Applied Ceramics*, v.110(4), p.233-237, 2011.
- (18) WANG, W., WANG, H., TSAI, H. Study on engineering properties of alkali-activated ladle furnace slag geopolymer. *Construction and Building Materials*, v.123, p.800-805, 2016.
- (19) SANTIN, E. Tijolo por tijolo, num desenho mágico. *Revista Técnica*. São Paulo, v. 4, n. 23, p. 18-24, 1996.
- (20) FARIA, P.; FONTES, T; SILVA, V. Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico. In: CONFRESSO CONTRUÇÃO 2012, Coimbra, Portugal. Anais... Coimbra, 2012.
- (21) CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H.C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. *Boletim 68*, IPT. São Paulo, 1995. p.118.
- (22) MIRANDA, L. M. C. C. Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada, 2009. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- (23) SEQUEIRA, A. C.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. Cal hidráulica – Um ligante para a reabilitação. In: 2.º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO. Anais...Lisboa, 2007.
- (24) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7175 – Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- (25) INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria. Lisboa: IPQ, 2002. NP EN 459-1/ 2011.
- (26) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- (27) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9939 – Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.
- (28) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 23 – Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

- (29) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- (30) COUTINHO, A. S. Fabrico e propriedades do Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 401p., v.1, 1988.
- (31) PAPAYIANNI, I., ANASTASIOU, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slags. Cement and Concrete Composites, v.34, p.400-407, 2012.

CHARACTERIZATION OF AN ECOLOGICAL BINDER FOR MORTARS OBTAINED FROM RECYCLING OF LADLE FURNACE SLAG

ABSTRACT

A sustainable binder obtained from recycling of a ladle furnace slag from Piracicaba, São Paulo, was produced in Laboratory of Construction Materials of Federal University of Ouro Preto (UFOP). A characterization work was performed and the results are presented. The physical, chemical and mineralogical properties was obtained using, among others, the following techniques: X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) with Rietveld refining method, optical microscopy and Scanning electronic microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDS). The chemical analysis showed predominance of CaO and SiO₃; the mineralogical analysis pointed the predominant presence of calcio-olivine, merwinite and pyroxene and; the images showed predominance of angular and elongated grains. According to results, the material was classified as a hydraulic binder, with characteristics comparable to hydraulic limes.

Key-words: ladle furnace slag, sustainable binder, hydraulic binder; sustainable mortar; binder characterization.