

ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM CONCRETOS: PROPRIEDADES MECÂNICAS E ANÁLISE PETROGRÁFICA¹

L.F. Arrivabene²

J.I. Calmon³

F.L.S. Souza⁴

M.C.B. Oliveira⁵

J.R. Oliveira⁶

Resumo

A produção de aço necessita de várias etapas e gera grandes quantidades de escórias cujos estoques crescentes vem preocupando os metalurgistas e ambientalistas. Este artigo foi desenvolvido, à partir de um trabalho mais amplo (ARRIVABENE, 2000), buscando o uso racional daquele subproduto industrial, de modo a minimizar possíveis problemas ambientais, para minimizar custos de produção, se agregar valor ao resíduo e reciclá-lo por meio da construção civil. Este trabalho, apresenta uma contribuição ao estudo do aproveitamento da escória de alto forno nas formas seguintes: escória de alto forno bruta britada (EAFBB), escória de alto forno granulada EAFG) e escória de alto forno granulada moída (EAFGM), que foram utilizadas como agregado graúdo, agregado miúdo e como substituto parcial do cimento, respectivamente. O resíduo industrial está disponível em quantidades significativas nos pátios das grandes siderúrgicas. Para tal, foi realizada a caracterização física, química, mineralógica e morfológico-estrutural das escórias. Diferentes dosagens de concretos foram produzidos com as escórias de forma que permitissem uma comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos concretos dosados com agregados convencionais (brita gnáissica e areia de sílica de jazida silicosa) com aquelas apresentadas pelos concretos com EAFBB, EAFG e EAFGM. As pesquisas desenvolvidas indicam o potencial de utilização da escória como agregado para concreto, que apesar da heterogeneidade do material, apresentou propriedades mecânicas, dentre elas pode-se mencionar a resistência mecânica e a deformação, com valores que superam aos do concreto convencional. Para explicar os valores alcançados pelas propriedades mecânicas nestes concretos buscou-se estudar a interface pasta-agregado pelo método da análise petrográfica que indicou uma interface mais coesa e mais densa nos concretos com escórias do que no concreto convencional. A viabilidade técnica do uso da escória bruta britada (EAFBB) como agregado graúdo, da escória granulada (EAFG) como agregado miúdo e da escória granulada moída (EAFGM) como substituto parcial do cimento, é apresentada por meio de vários ensaios, análises e resultados comparativos aos concretos convencionais.

Palavras-chave: Escória de alto forno; Concreto de escória; Escória

BLAST FURNACE IN CONCRETE

Abstract

This paper came forth as a collaboration for the study of blast furnace slags generated in the major steel mills in the following forms: blast furnace air-cooled slag (EAFBB), blast furnace granulated slag (EAFG) and blast furnace granulated ground slag (EAFGM), used in the production of concrete, respectively as coarse aggregate, fine aggregate and as partial substitute for cement. Large quantities of these slags are found in the storage yards of the said steel mills. As civil construction is a potential option for the use of rough slag, the technical feasibility of its application as an aggregate to concrete has been researched, thereby demanding its physical, chemical, morphological, structural and mineralogical characterization according to technical standards. Before the possibility of using this by-product in civil construction, additional studies were carried out to verify its potential use in the production of some materials amongst which concrete is the main one. Besides being technically feasible, the use of slag in the production of some materials not only add economical value to them but also minimizes the impacts caused by civil construction, thereby diminishing waste and the need of big areas for its storage. The physical and mechanical properties of concrete-slag are presented in this paper which, at the same time, aims at widening the applicability of the industrial residue, decreasing the final cost of some types of concrete. Comparisons between the conventional concrete and those made up of slag are made in this document, thus indicating that the latter may have some specific applications.

Key words: Blast furnace slags; Blast furnace slags in concrete

¹ Contribuição técnica apresentada no 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestre em Engenharia Ambiental. Pesquisador do CEFET-ES-Brasil.

³ Dr. Ing., Professor Pesquisador do Programa de Mestrado em Engenharia Civil PPGEC/UFES–

⁴ Mestre, Professor Pesquisador do Programa de Mestrado em Engenharia Civil PPGEC/UFES–

⁵ Dr., Professora Pesquisadora do IPT – SP.

⁶ Dr., Professor Pesquisador do CEFET-ES-Brasil

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é sem nenhuma dúvida um das áreas principais de reaproveitamento de resíduos, haja visto, sua diversidade de materiais como também a quantidade que é necessária para consumo anualmente, visando atender a demanda cada vez maior por moradias. Este artigo, trata do reaproveitamento do subproduto escória de alto forno para a produção de concretos, visando algumas utilizações, tais como bloco de enrocamento e demais obras marítimas.

A escória de alto forno, como também outros materiais, para que eles possam ser utilizados como elemento de construção, eles devem ser caracterizados corretamente. Inicialmente foi feita a caracterização tecnológica das escórias, usando normas da França e Inglaterra, uma vez no Brasil não existem normas para tal fim. Foram feitas a caracterização física, caracterização química, caracterização mineralógica, caracterização morfológica - estrutural das escórias, cujas conclusões principais serão apresentadas na parte final deste artigo.

Em seguida, foram dosados concretos com escórias cujas propriedades foram comparadas com as propriedades do concreto convencional. Além disso, foram analisadas e comentadas uma série de características observadas durante a realização da pesquisa que são pertinentes aos concretos com escórias, onde buscou-se justificativas para as mesmas, além de apresentar estudos da zona de transição destes concretos, utilizando-se a técnica de microscopia petrográfica, para justificar os valores encontrados para algumas das propriedades medidas do concreto-escória, tais como a resistência à compressão axial, cujos valores obtidos para todas as idades são superiores aos valores obtidos no concreto convencional.

Apesar de alguns países, dentre eles podem ser mencionados a França, a Inglaterra, Estados Unidos e Japão, já usarem a escória como elemento de construção, seu uso no Brasil é ainda muito incipiente e necessita de mais pesquisas e trabalhos que realmente demonstrem seu potencial como elemento de construção. Sem intenção de aprofundar os conhecimentos ora existentes sobre o assunto, mostra-se no quadro 1 abaixo, alguns dos trabalhos já realizados sobre o tema em questão.

Quadro 1. Alguns trabalhos na área de utilização de escórias de forno alto.

Autores e Normas	Artigos ou Normas
AFNOR–NFP 18.306 (1965)	Latier granulé.
MOURÃO & CARDOSO (1977)	Uso da escória granulada como agregado na produção de blocos de concretos.
HOFFMANN et al (1978)	Le beton tout latier.
MUNN (1979)	Blast Furnace slag as aggregate in concrete.
FUJIMOTO (1979)	Cooperative studies in Japan on granulated slag sands for concrete.
NUMATA et al (1981)	Utilization of granulated blast furnace slag as concrete aggregates.
British standards Institution-BSI (1983)	Air-cooled blast furnace slag coarse aggregate for concrete.
SILVA & ALMEIDA (1986)	Escória de alto forno granulada como agregado miúdo para argamassa e concreto.
SCANDIUZZI & BATTAGIN (1990)	A utilização da escória granulada de alto forno como agregado miúdo.
COUTO RIBEIRO et al (1990)	Estudo do aproveitamento de escória como agregado miúdo na produção de argamassa e concreto.
COUTO RIBEIRO et al (1990)	Disposição de rejeito siderúrgico industrial através de reciclagem.
CINCOTTO et al (1992)	Caracterização de escória granulada de alto forno e seu emprego como aglomerante e agregado.
SOLOMON (1993)	Minerals yearbook, slag-iron and steel. Annual report.
GEYER et al (1994)	Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na indústria da construção civil.
MARQUES (1994)	Escória de alto forno: Estudo visando seu emprego no preparo de argamassas e concretos.
ARRIVABENE (2000)	Estudo da utilização da escória de alto forno na produção de blocos de concretos.

Finalmente, cabe destacar, que este artigo surgiu fundamentado num trabalho mais amplo referente à dissertação de mestrado intitulada “Uma contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para a produção de concreto” (ARRIVABENE, 2000).

2 DESENVOLVIMENTO

Como a escória de alto forno é um resíduo sólido para o qual no Brasil não existem normas para sua utilização como agregado de concreto, o trabalho começou com a caracterização tecnológica da mesma, inclusive tendo como subsídio as normas de origem inglesa BS 1047 (1983) e NFP 18.306 francesa (1965). Do ponto de vista tecnológico foram realizados, os seguintes ensaios: Caracterização Química, Mineralógica, Físico-Mecânica, Textura Superficial, Expansibilidade em Autoclave e Durabilidade, os quais podem ser vistos detalhadamente em Arrivabene, 2000.

Uma vez, feita toda a caracterização tecnológica dos materiais envolvidos na pesquisa chamou-nos a atenção os seguintes fatores:

- a textura superficial das escórias mostraram muito porosas, o que demandou mais água na produção dos concretos;
- a expansibilidade medida pela reatividade potencial dos agregados mostraram inócuas conforme Figura 1 mostrada, á seguir:

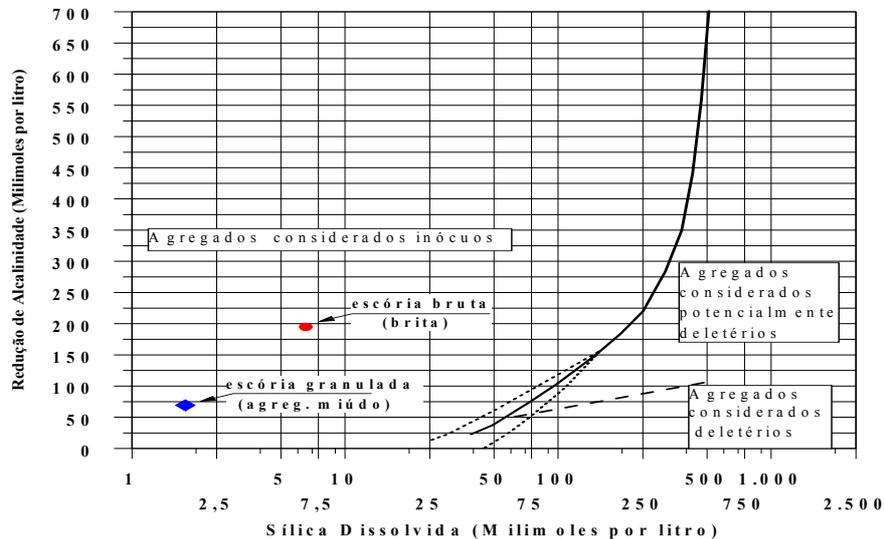


Figura 1. Ensaio de expansibilidade em autoclave dos agregados-escórias.

O passo seguinte foi a produção de três tipos de concretos, à saber:

Concreto 1: é o concreto contendo água, cimento, areia de sílica comum de jazida como agregado miúdo e brita de origem gnáissica como agregado graúdo; concreto que este usado como referência.

Concreto 2: é o concreto contendo água, cimento, 10% de escória granulada moída (EAFGM) em substituição ao cimento para corrigir a falta de finos da escória granulada (EAFG), escória granulada como agregado miúdo e a escória bruta britada (EAFBB) como agregado graúdo.

Concreto 3: é o concreto contendo água, cimento, 50% de escória granulada moída (EAFGM), sendo 10% para corrigir a falta de finos da escória granulada (EAFG) usada como agregado miúdo e mais 40% como substituição do cimento, escória granulada (EAFG) como agregado miúdo e escória bruta britada (EAFBB) como um agregado graúdo.

A produção dos concretos obedeceu ao método empregado pelo American Concrete Institute (ACI) e é um método bastante usado no meio da construção civil. Cabe ressaltar, que durante a mistura destes concretos foi observado que devido algumas características das escórias, uma atenção especial deve ser dada para se manter a trabalhabilidade do concreto, fatores estes que serão comentados dentro das conclusões do trabalho.

O principal equipamento para a produção de concreto foi uma betoneira de um metro cúbico de capacidade nominal, além de formas padronizadas para obtenção de corpos de prova para medir a resistência mecânica dos concretos produzidos.

3 COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS

3.1 Comportamento dos Concretos no Estado Fresco

A avaliação do comportamento mecânico dos concretos levou em consideração as propriedades do concreto no estado fresco, cujas propriedades medidas podem ser vistas no quadro 2.

Quadro 2. Propriedades do Concreto no estado fresco.

Ar apreendido (%)			Abatimento (mm)		
Concreto 1	Concreto 2	Concreto 3	Concreto 1	Concreto 2	Concreto 3
1,7	4,0	3,6	50	50	45

Ao se analisar o quadro 2, verifica-se, que os concretos contendo escórias apresentam o teor de ar aprisionado maior do que o concreto convencional ou concreto referência, confirmando o caráter poroso das escórias. O concreto 2, é o que apresenta o maior teor de ar aprisionado, com 4%.

3.2 Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

As propriedades avaliadas para o concreto no estado endurecido foram:

1) resistência à compressão axial onde verificou-se que o concreto com escória (concreto 2) foi o que apresentou melhor resultado, porque os valores de resistência obtidos para ele foram superiores aos valores obtidos para o concreto referência para todas as idades.

2) resistência à tração por compressão diametral onde o concreto 2 (concreto com escórias) os valores obtidos foram levemente maiores do que os do concreto referência para a maioria das idades analisadas.

3) resistência à tração na flexão, os valores observados para os concretos com escórias (concreto 2 e 3) foram muito maior do que os valores observados para o concreto referência para todas as idades analisadas. Tais valores podem ser considerados elevados, o que demonstra os concretos com escórias possuírem uma grande aderência entre a pasta e o agregado, como pode ser observado pelo estudo da zona de transição feita pela técnica de microscopia petrográfica apresentada pelas Figuras 2, 3, 4, 5.

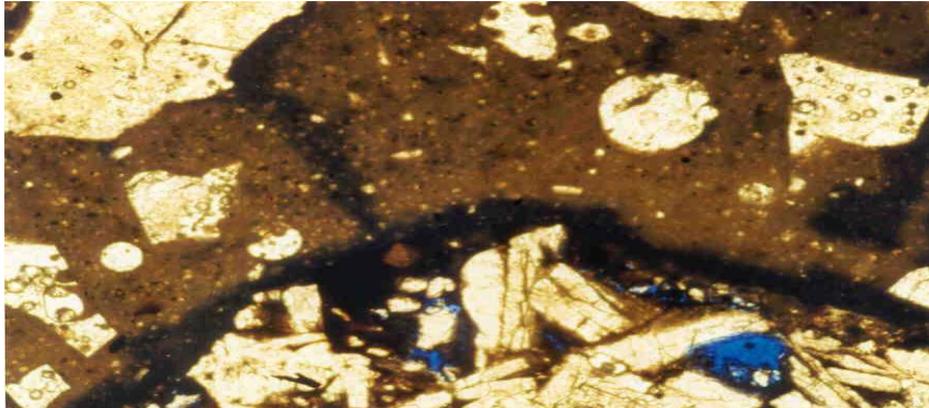


Figura 2. Zona de transição do concreto-escória que comprova pasta mais densa com menos porosidade. Aumento de 38 X.

4) o módulo de deformação dos concretos que contêm escórias apresentou valores próximos aos do concreto referência para a idade de 28 dias. Porém, na idade de 91 dias o concreto com escórias (concreto 2) foi o que apresentou módulo de deformação maior, o que implica em uma capacidade de absorção de mais carga para uma deformação menor.

As razões pelas quais os concretos contendo escórias (concreto 2 e concreto 3) possuem melhores propriedades mecânicas que o concreto usado como referência (concreto 1) podem ser explicadas devido a vários fatores, tais como: microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 1997), aderência maior da pasta-agregado, eventual hidratação superficial da escória granulada usada como agregado miúdo (SCANDIUZZI et al, 1990) e devido as melhorias que a escória bruta britada, usada como agregado graúdo, pode produzir quando age no sentido de favorecer a união mecânica entre a pasta e o agregado. A sucessão de ilustrações obtidas por estudos feitos na zona de transição pasta-agregado dos concretos contendo escórias, usando da técnica de microscopia petrográfica corroboram estas explicações.

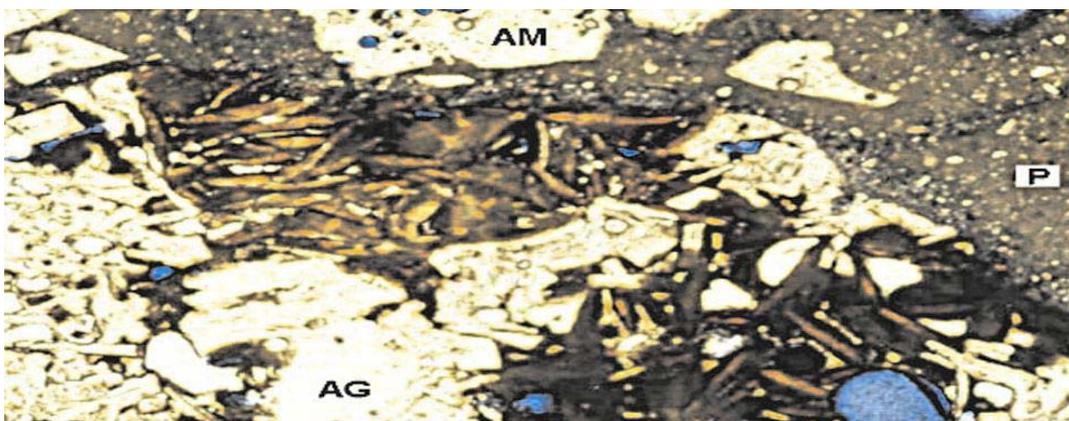


Figura 3. Presença de porções amorfas na zona de transição do concreto-escória. Aumento de 38 X. AG → Agregado Graúdo – AM → Agregado Miúdo – P → Pasta

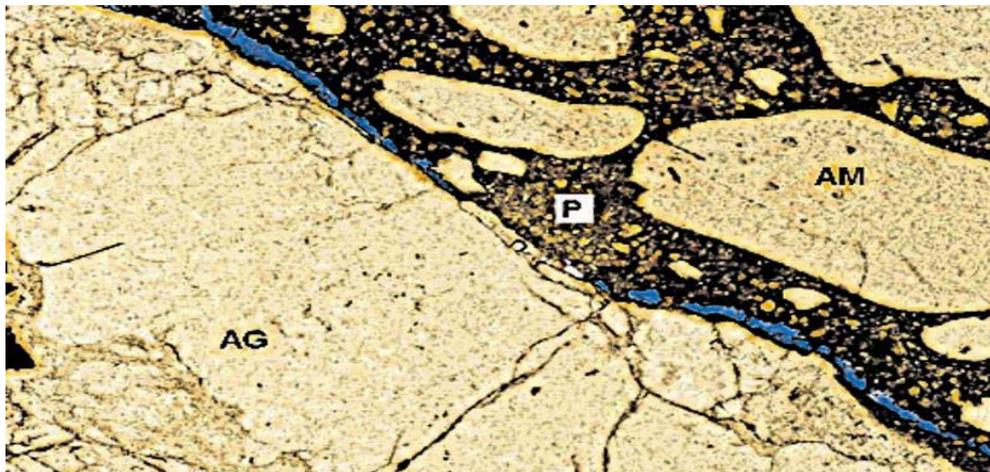


Figura 4. Presença de Microfissuras (azul) na zona de transição do concreto referência. Aumento de 38 X.

A zona de transição do concreto convencional indica a presença de microfissuras ao longo do agregado graúdo (Figura 4). Já as porções amorfas indicam pasta ainda não completamente hidratada propiciando maior resistência ao longo do tempo (Figura 3).

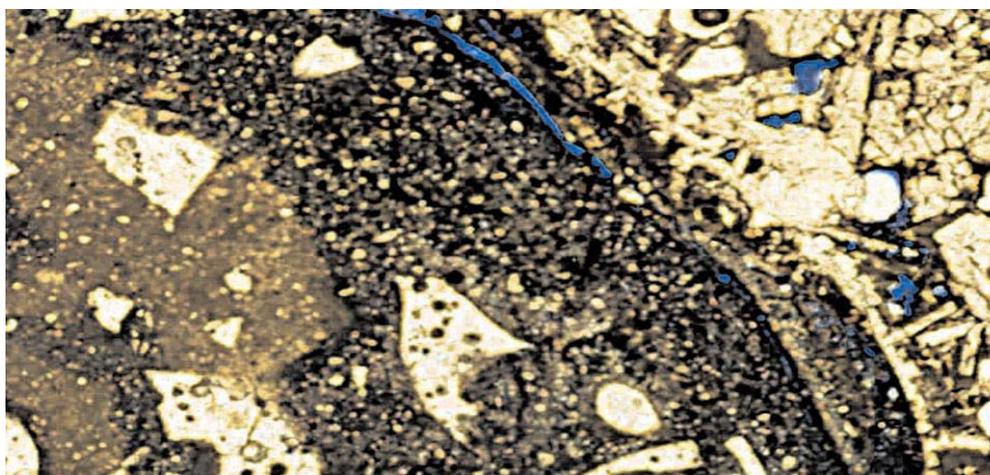


Figura 5. Zona de transição do concreto-escória. Aumento de 38 X.

A Figura 5 evidencia a maior coesão da pasta-agregado, exibindo uma pasta mais densa e uma maior aderência pasta-agregado.

4 CONCLUSÕES

Pode-se chegar as seguintes conclusões com relação o uso das escórias de alto forno como agregado de concreto, depois da realização deste trabalho:

- As escórias de alto forno na forma granulada moída, escória granulada e escória bruta britada são de natureza básica, onde os óxidos básicos principais são o óxido de cálcio (CaO), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de magnésio (MgO).
- A escória possui os teores de CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , FeO, MnO e S (total) dentro dos limites estabelecidos pela norma francesa NF P 18306 (1965), sendo o MgO a única exceção, alcançando 8,3%, quando o limite estabelecido é de 6%. Porém, a norma salienta que valores maiores podem ser aceitos, não estabelecendo o valor máximo aceitável.
- O ensaio de expansibilidade realizado em autoclave (ASTM C-151, 1993) pode ajudar de alguma maneira, no sentido de mostrar o potencial de expansão que a escória usada pode ter. O resultado da hidratação acelerada em autoclave com aumento de temperatura e pressão indica que os valores estão abaixo do limite de referência para o cimento que é de 0,8%, de acordo com a norma ASTM C-150, (1997).
- Com relação a durabilidade dos sistemas com escória de alto forno, foram realizados ensaios de reatividade das escórias com álcalis do cimento (Método ASTM C 1260, 1994) e Método Químico NBR 9774 (1987). Os resultados encontrados permitem interpretar que os agregados são inócuos.
- Buscando descobrir a presença de compostos potencialmente reativos nas escórias, condições impostas pela norma BS 1047 (1983) relativo as relações entre compostos químicos e seus teores na escória, tais relações foram verificadas e atendidas.
- A área específica do grão da escória granulada moída é de $497 \text{ m}^2/\text{kg}$, maior que a área específica do cimento usado ($425 \text{ m}^2/\text{kg}$). Trata-se de partículas muito finas, não havendo nenhum resíduo na peneira de 0,075 mm e nem na peneira de 0,44 mm.
- Outro aspecto observado foi o teor insuficiente de finos na escória granulada usada como agregado miúdo. A qualidade foi melhorada durante a produção dos concretos estudados, depois de experiências, sendo usada a escória granulada moída no percentual de 10% sobre o peso do cimento.
- Com relação a produção dos concretos que contêm escória, é oportuno salientar a quantidade maior de água de exigida pela mistura, devido ao caráter poroso da escória utilizada como agregado.
- Analisando-se os resultados da resistência à compressão dos concretos com escória, verifica-se que o concreto 2 apresenta os melhores resultados para todas as idades analisadas. A resistência à compressão do concreto com escória aos 91 dias é 13,3% maior que o do concreto de referência.
- Os resultados encontrados do módulo de deformação para a concreto-escória 2, para as idades de 28 e 91 dias foram maiores do que os encontrados para o concreto referência. Comparando os resultados experimentais obtidos para os concretos aos 91 dias com resultados obtidos por formulações empíricas da ACI 318-89 (1994) e TAKIZAKI (1988), foi verificado que os valores experimentais se ajustam bem aos valores calculados.

- A análise da zona de transição pasta-agregado do concreto referência e do concreto com escória, usando a técnica de análise petrográfica, permite concluir que os concretos que contêm escórias como agregado possuem uma zona de contato cuja aderência é pasta-agregado é melhor que a zona de contato do concreto de referência, o que confirma os resultados obtidos para os valores das propriedades mecânicas do concreto-escória.

Os resultados obtidos ao longo do trabalho, permitem concluir sobre a viabilidade técnica do uso das escórias nas formas (EAFGM); (EAFG) e (EAFBB) para o emprego na produção de concreto, denominado neste artigo de concreto-escória, apresentando atuação bastante satisfatória, quando comparado com o concreto de referência (concreto esto com brita gnáissica e areia natural). O uso de escória como agregado para concreto merece mais pesquisa e uma fiscalização cuidadosa durante o processo de produção.

Agradecimentos

Nossos sinceros agradecimentos à todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, em particular à Aracruz Celulose, Furnas Centrais Elétricas, Cimento Nassau, Companhia Siderúrgica de Tubarão e ao Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

REFERÊNCIAS

- 1 ARRIVABENE, L. F. "Uma contribuição ao estudo de utilização da escória de alto forno bruta e granulada para a produção de concretos". Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental- UFES. Vitória, 2000.
- 2 BATTAGIN, U. M. F.; SANDIUZZI, L. "O Uso da escória Granulada de Alto Forno como Agregado Miúdo." Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1990. Boletim Nº 35.
- 3 CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPPYAN, V. "Caracterização da Escória Granulada de Alto Forno e seu Emprego como Mistura e Agregado." Boletim do IPT, São Paulo, Setembro/1992. Nº 65.
- 4 COUTO, R. C.; PERDIGÃO, T. S.; PINTO, J. D. S. "Estudo do Uso de Escória Granulada de Alto Forno como Agregado Miúdo na Produção de Argamassas e Concreto." Em: 10º Encontro Nacional da Construção, Gramado, 1990. Vol.1. Pp.811-813.
- 5 COUTO, R. C.; PINTO J. D. S.; STIRLING, T. P. "Disposição de Rejeito Siderúrgico Industrial através da Reciclagem." Metalurgia e Materiais. São Paulo, Março/1992. Pp. 40-44
- 6 FUJIMOTO, Y. "Cooperative studies in Japan on granulated slag sands for concrete". IMM, Ilawarra Branch, Aus. Utilization in the Steel Plant. Simpósio de Escórias, Austrália, Fevereiro/1979.
- 7 GEYER, R. M. T.; MOLIM, D. C. C.; Vilela, C. F. "Metallurgical Slags: Caracterização e Aplicações na Indústria Local de Edifícios." Em: V Encontro Regional de Meio-Ambiente. Vitória, Novembro/1992.

- 8 HOFMANN, R.; KIRPACH, C.; DIDERICH, G.; REINARD, C. H. "Le Laitier de Tout de Beton." Em: Colloque Internationale sur Granulaires de Materiaux. Simpósio Internacional em Agregados e Concretos, Budapest, Outubro/1978.
- 9 MARQUES, J. C. "Escória como Agregado Graúdo". Estudo que Busca seu Emprego na Preparação de Argamassa e Concretos. São Paulo. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Março/1994.
- 10 MOURÃO, J. N.; CARDOSO, E. V. "O Uso da Escória Granulada como um Agregado na Produção de Blocos de Concreto." Em: 19º Congresso Brasileiro de Cimento IBRACON, São Paulo, 1977.
- 11 MUNN, R. L. "Blast Furnace Slag in Concrete in Australia". Institute Metallurgical de Filial de Illawarra. Utilisation in the Steel Plant. Simpósio em Escórias, Austrália, Fevereiro/1979.
- 12 NEVILLE, U. M. "Propriedades do Concreto." Publicação PINI. São Paulo, 1982.
- 13 NUMATA, S.; EONDO, N.; KAWAMOTO, T.; NAGASE, T.; OKIMOTO, M.; MAEDA, A. "Utilisation of Granulated Blast Furnace Slag as Concrete Aggregate." Nippon Steel Technique Report, Tóquio, Junho/1981. Nº 17.
- 14 OLIVEIRA, M. C. B.; NASCIMENTO, C. B. "Microestrutura de Morteiros Endurecidos: uma Contribuição de Petrografia." Em: V Congresso Íbero-Americano de Patologia de Las Construciones, CONPAT, Montevideú, 1999. Pp. 226-232.
- 15 SCANDIUZZI, L.; BATTAGIN, U. M. F. "O Uso da Escória Granulada como Agregado Graúdo e como Agregado Miúdo." Boletim da ABCP, São Paulo, 1990. Nº 35.
- 16 SILVA & ALMEIDA, C. "Escória de Alto Forno Granulada como Agregado Miúdo para Argamassa e Concreto." Em: 1º Simpósio Nacional de Agregados. Departamento de Construção Civil. USP, São Paulo, 1986. Pp. 225-273.
- 17 SOLOMON, C. "Minerals Yearbook". Slag-Iron and Steel. Annual Report. Bureau of Mine. Washington, USA, 1993.
- 18 TAKIZAKI, M. "Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete." In: Second Symposium International RILEM. Tokyo, Japan, 1988. Pp. 557-564.