Estudo da Influência de Adições Pozolânicas e Minerais no Concreto

A. S. Liduário, Furnas; L.A.Farias, Furnas; M.A.S.Andrade, Furnas; R. M. Bittencourt, Furnas.

Resumo- **O conhecimento da influência do uso das adições minerais em concretos permite avaliar a viabilidade de sua utilização em obras e, dentre outros fatores tais como disponibilidade, distância de transporte e custo, verificar sua eficiência e aplicação, com aproveitamento desses materiais que poderiam ser descartados como rejeitos, na melhoria das características do concreto. Em função disso, encontra-se em desenvolvimento um estudo para a avaliação da eficiência das adições - agregado pulverizado, sílica ativa, pozolana natural, escória de alto forno moída, metacaulim, cinza de casca de arroz em diferentes teores, com ênfase nos benefícios que elas podem promover para as propriedades mecânicas, elásticas e térmicas do concreto. Além dessas propriedades, a durabilidade do concreto expressa através dos ensaios de permeabilidade e reação álcali agregado.**

Para o desenvolvimento da pesquisa foi estudado o concreto convencional, contemplando diferentes tipos litológicos de agregado.

Palavras-chave— **Concreto. Agregado Pulverizado. Granito. Sílica. Escória. Pozolana. Cinza de Casca de Arroz. Cinza Volante. Metacaulim. Resistência. Compressão. Elevação Adiabática. Reatividade Potencial. Permeabilidade.**

I. Introdução

As adições minerais são materiais silicosos ou sílico aluminosos, finamente moídos, que podem ser adicionados ao concreto em grande quantidades, na faixa de 20 a 100% da massa do cimento Portland, com o objetivo de melhorar as suas propriedades (MEHTA & MONTEIRO, 1994). O material pode ser moído junto com o clínquer do cimento Portland ou gesso ou misturado posteriormente com o cimento.

A origem das adições pode ser natural ou artificial (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). Segundo os autores, os materiais de origem natural possuem atividade pozolânica no estado natural ou podem facilmente ser convertidos em pozolanas por britagem, moagem, classificação por tamanho e, em alguns casos, ativação térmica. Dentro desta categoria, estão incluídas as terras diatomáceas, os vidros e tufos vulcânicos e as argilas ou folhelhos calcinados. Os materiais artificiais são subprodutos das indústrias de transformação e beneficiamento, que requerem ou não processamento (secagem e pulverização) antes do emprego como adição mineral. Os principais subprodutos utilizados são a escória de alto forno, a cinza volante, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz.

Este projeto foi apoiado financeiramente pelo Programa Anual de P&D de FURNAS Centrais Elétrica S.A., sob gestão da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Os pesquisadores fazem parte da equipe de engenheiros do Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S.A. (concreto@furnas.com.br).

A incorporação de finas partículas em misturas de concreto tende a melhorar a trabalhabilidade e reduzir o consumo de água, exceto em materiais muito finos como sílica ativa. Em geral, há um incremento na resistência, na permeabilidade e aumento da durabilidade ao ataque químico, podendo ocorrer redução das fissuras térmicas devido ao menor calor de hidratação. Além dos benefícios técnicos, deve-se destacar os benefícios econômicos pela substituição parcial ao cimento Portland, tendo em vista seu alto custo de produção. Finalmente, ressalta-se os benefícios ecológicos, uma vez que muitos materiais utilizados como adição contêm em sua composição elementos poluentes, tóxicos e sua disposição em mananciais ou seu acúmulo em aterros representa risco ao meio ambiente (MEHTA & MALHOTRA, 1996).

II. Característica da Pesquisa

O início do estudo foi caracterizado pela determinação de uma dosagem de referência. Em seguida, foram executadas dosagens com variação dos teores das adições em substituição ao cimento e a substituição parcial do agregado miúdo por agregado pulverizado, tendo para todas as dosagens uma relação A/C_{eq} (Água/Cimento equivalente) igual a 0,514.

Quanto à utilização do agregado pulverizado como substituição parcial do cimento, evidentemente, não é esperado que o concreto com esse tipo de material apresente o mesmo comportamento daqueles em que foram empregadas as demais adições, sendo um dos enfoques da pesquisa a análise da diferença do comportamento do agregado pulverizado como adição e como filler. Na figura 1 está apresentado um esquema como foi conduzido o estudo.

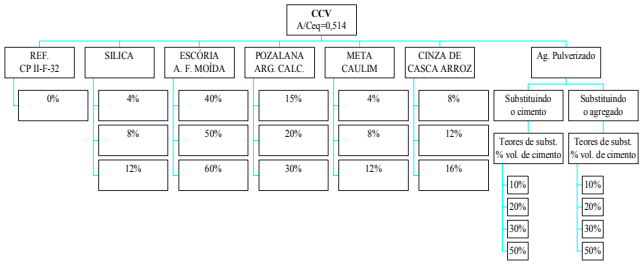

Figura 1. Esquema como foi conduzido o estudo

Os parâmetros estudados neste estudo são os seguintes :

- ✓ Resistência à Compressão.
- ✓ Elevação Adiabática
- ✓ Reatividade Potencial
- ✓ Permeabilidade

A. Materiais

Os materiais empregados na pesquisa são apresentados a seguir:

- Agregado graúdo com Dmáx 25 mm de cada tipo litológico (Granito, Metagrauvaca e Quartzo Micaxisto);
- Areia natural;
- Cimento Portland CP II-F-32, com área específica 3.320 cm²/g;
- Aditivo plastificante e retardador de pega;
- Adições pozolânicas como foram supracitadas (figura 1) tem-se na tabela 1 a origem de cada adição.

Tabela 1 – Origem das Adições Pozolânicas e Minerais

Materiais	Origem
Sílica Ativa	Subproduto das indústrias de silício metálico
Cinza de Casca de Arroz	Combustão controlada da casca de arroz
Metacaulim	Calcinação do argilomineral caulinita
Pozolana de Argila Calcinada	Calcinação de argilas
Cinza Volante	Subproduto da queima de carvão em pó em termelétricas
Agregado Pulverizado	Moagem do resíduo da britagem
Escória de Alto Forno	Subproduto da fabricação do ferro gusa em alto forno

B. Caracterização dos Materiais

Na Tabela 2 e na figura 2 estão apresentadas as características e granulometria a laser do cimento e das adições pozolânicas e minerais utilizadas.

Tabela 2 – Características do Cimento e das Adições Pozolânicas e Minerais

Materiais	I.A.P Cal (MPa)	I.A.P Cim %	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
			(%)							
Cimento CP II F-32	-	-	18,58	4,78	3,40	61,32	1,54	0,52	0,69	2,59
Sílica Ativa	-	93,9	91,58	0,17	0,46	0,70	0,72	0,20	0,25	0,35
Cinza de Casca de Arroz	12,5	96,2	79,82	0,27	3,11	0,63	0,81	0,19	1,26	0,13
Metacaulim	15,1	-	46,70	41,41	3,49	0,53	0,53	0,00	0,25	0,61
Pozolana	10,9	95,6	54,40	16,54	4,67	12,57	4,51	0,16	3,62	-
Cinza Volante	8,7	79,5	58,45	29,75	4,77	2,15	0,93	0,34	0,66	0,94
Agregado Pulverizado (Granito)	4,1	68,6	67,19	18,78	2,45	1,56	0,59	3,81	2,94	-
Agregado Pulverizado (Metagrau-vaca)	-	70,28	63,98	12,15	9,30	2,93	2,88	2,05	3,19	-
Agregado Pulverizado (Quartzo Micaxisto)	-	53,75	69,82	12,51	4,6	1,4	1,92	1,81	4,29	-
Escória de Alto Forno	11,4	107,3	35,04	12,43	0,16	41,58	8,68	0,31	0,55	0,12

Legenda:

I.A.P.Cal = Índice de Atividade Pozolânica com a Cal (limite pela NBR 5751/92 - ≥ 6,0 MPa)
I.A.P.Cim = Índice de Atividade Pozolânica com o Cimento (limite pela NBR 5752//92 - ≥ 75,0%)

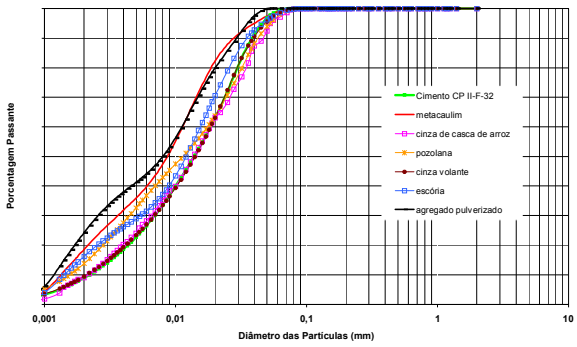

Figura 2. Granulometria a Laser das Adições

III. Apresentação e Análise dos Resultados

A. Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos conforme o método NBR 5739/94, da ABNT, em corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 15 cm x 30 cm. Na figura 3 estão apresentados os resultados médios na idade de 28 dias dos concretos estudados com as adições para os três tipos litológicos.

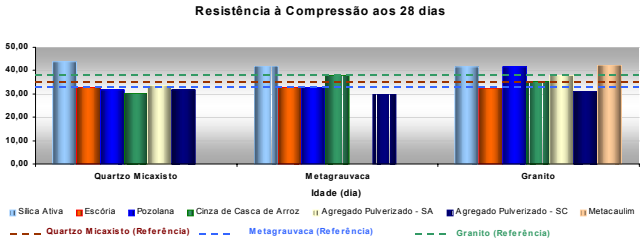

Figura 3. Valores Médios de Resistência à Compressão (MPa) aos 28 dias

De uma forma geral, é possível observar que a sílica ativa obteve o melhor resultado em todos os tipos litológicos, e como era previsto, os agregados pulverizados substituindo parte do cimento apresentaram os piores resultados, o que pode ser confirmado pelo ensaio de atividade pozolânica. Já o concreto com substituição parcial do agregado miúdo pelo agregado pulverizado obteve um ligeiro aumento na resistência com o granito. A pozolana apresentou um comportamento satisfatório com o agregado granito e a cinza de casca de arroz com o agregado metagrauvaca. Essa última obteve resultados satisfatórios em estudos realizados por HASPARYK et al. (2003). Um bom resultado próximo da sílica ativa também foi observado com o metacaulim no tipo litológico granito. Nos estudos realizados por LIDUÁRIO et al. (2001) e TRABOULSI et al. (2003) foi observado que concretos convencionais com utilização de metacaulim, 12% de substituição do volume de cimento, superou os resultados obtidos em todas as dosagens com as diversas adições. Através dos resultados de resistência à compressão apresentados, percebe-se que, numa associação da atividade pozolânica da adição com o preenchimento dos poros do concreto (o denominado efeito *filler*) no caso do agregado

pulverizado, a substituição de alguns desses materiais nas dosagens influencia significativamente na melhoria desta propriedade.

C. Elevação Adiabática

O ensaio de elevação adiabática foi realizado segundo o método NBR 12819/93 da ABNT.

O conhecimento da elevação da temperatura do concreto, decorrente de reação exotérmica resultante da hidratação do cimento, nas construções massivas, só é possível através do conhecimento da elevação adiabática da temperatura.

O calor gerado nessa reação, embora possa ser medido por ensaio com o próprio cimento na pasta pura ou em argamassa, só pode ser conhecido com exatidão através da curva de elevação adiabática da temperatura do concreto, medida em um calorímetro adiabático.

Os coeficientes de elevação adiabática, ou evoluções unitárias de temperatura, foram obtidos dividindo-se as elevações de temperatura pelo consumo de aglomerante.

Os fluxos de liberação de calor foram obtidos dividindo-se as elevações de temperatura pelo tempo decorrido em horas. Foi tomada como referência a temperatura ocorrida na primeira hora.

O ensaio de elevação de temperatura foi realizado apenas para os teores intermediários de cada adição e com o tipo litológico granito, uma vez que o tipo litológico não influencia na elevação adiabática. O consumo equivalente de cimento dos concretos foi de 380 kg/m^3. Nas figuras 4 e 5 estão apresentados os resultados da elevação adiabática.

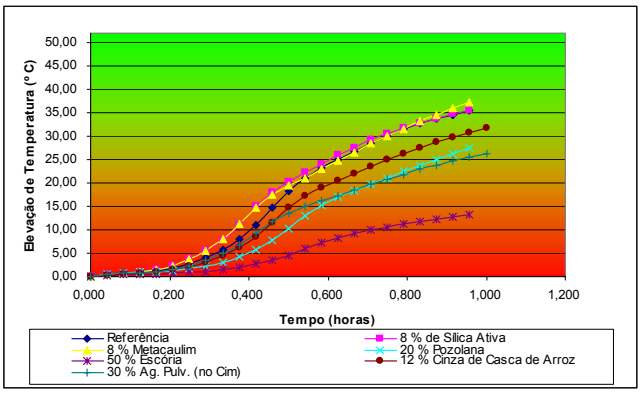

Figura 4. Elevação Adiabática nas primeiras horas até 1 dia de ensaio.

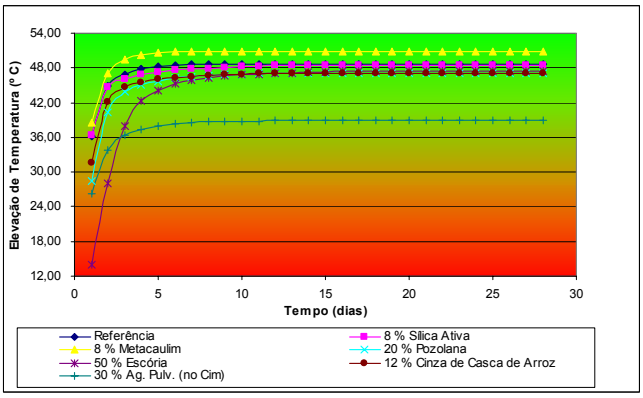

Figura 5. Elevação Adiabática nas primeiras horas até 1 dia de ensaio.

Nota-se que nas primeiras horas de hidratação, há uma aceleração da elevação de temperatura adiabática, alcançando um pico máximo onde os valores tornam-se constantes. Em geral, as misturas mais reativas como o metacaulim e a sílica ativa alcançaram valores superiores de elevação de temperatura, sendo seguidos pelo concreto com argila calcinada e pelo concreto com escória de alto forno.

Na primeira hora de cura, observa-se que os valores de elevação de temperatura adiabática para as misturas com 8% de metacaulim e com 8% de sílica ativa foram similares a do concreto de referência nas primeiras horas. Os valores máximos obtidos foram para o metacaulim, para a sílica ativa e para o concreto de referência. Nas misturas com 20% de argila calcinada e 50% de escória, a elevação de temperatura foi inferior a do concreto de referência.

Com alguns dias de ensaio, observa-se que a máxima elevação de temperatura foi atingida pelo concreto com 8% de metacaulim, sendo seguido pelo concreto de referência e pelo o concreto com sílica ativa. A temperatura máxima foi alcançada aproximadamente aos 3 dias de ensaio para o metacaulim, sílica ativa, cinza de casca de arroz, pozolana e o concreto de referência, indicando a alta reatividade de algumas destes materiais. Resultados similares foram obtidos por outros pesquisadores (ZHANG & MALHOTRA, 1995; WILD et al., 1996), atribuindo esse comportamento à aceleração da hidratação do cimento Portland, por exemplo, pelo metacaulim e à rápida reação com o $Ca(OH)_2$, liberado na hidratação do cimento.

D. Reatividade Potencial

Os ensaios de reatividade potencial foram realizados combinando um cimento com alto teor de álcalis e substituições parciais de cimento e de agregado miúdo por agregado pulverizado, comparando com uma referência sem substituição. Também foi utilizada areia artificial de cada tipo litológico empregado no estudo. O ensaio não foi realizado com o tipo litológico granito, uma vez que apresentou um comportamento inócuo na referência, não necessitando a verificação da reatividade com as adições.

As argamassas foram preparadas nas relações 1:2,25, conforme estabelecido no método de ensaio (ASTM C-1260, 2001). As Fotografias 1 a 4 ilustram etapas do ensaio de reatividade potencial e na figura 6 o resultado do ensaio.

Fotografia 1 - Conjunto de Tanques

Fotografia 2 - Vista Interna do Tanque

Fotografia 3 - Retirada da Barra

Fotografia 4 - Leitura/Relógio Digital

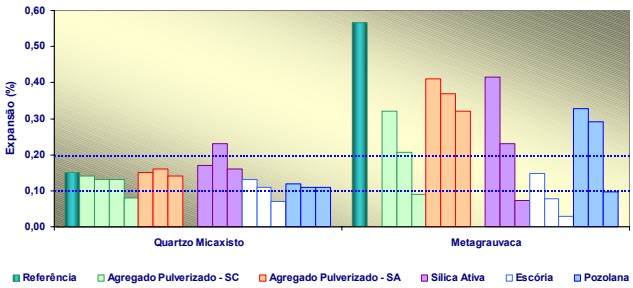

Figura 6. Reatividade Potencial

A Norma ASTM C-1260 (2001) apresenta os seguintes parâmetros para a expansão provocada pela reação álcali-agregado:

a) Expansão inócua para valor menor que 0,10% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem;

b) Expansão deletéria para valor maior que 0,20% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem; e

Valor entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias, pode ser tanto expansão inócua quanto deletéria, sendo necessárias informações suplementares sobre os materiais em evidência, ou ainda acompanhamento da variação de comprimento até a idade de 28 dias.

É possível observar que apenas a escória, sílica ativa e a pozolana apresentaram comportamento inócuo, ou seja, estes materiais inibiram a expansão em alguns teores. O emprego de adições minerais pode suprimir as expansões causadas pela RAA, através dos seguintes mecanismos: a) redução da permeabilidade e conseqüente redução da mobilidade de íons; b) aumento da resistência, inclusive resistência às tensões expansivas desenvolvidas pela RAA; c) diluição dos álcalis como resultado da substituição do cimento e; d) formação de produtos secundários da reação pozolânica, que aprisionam os íons álcalis e reduzem o conteúdo de $Ca(OH)_2$ da pasta de cimento, reduzindo os íons álcalis e o pH da solução dos poros (DUCHESNE & BÉRUBÉ, 1994a; RAMACHANDRAN, 1995). O efeito benéfico das adições é atribuído principalmente à redução do teor de álcalis da solução dos poros, a um nível seguro. Quanto menor o teor de álcalis das adições, do cimento e maior o teor de substituição, mais facilmente esse nível é atingido (DUCHESNE & BÉRUBÉ, 1994b).

E. Permeabilidade

Permeabilidade é a propriedade que indica a facilidade que um fluido tem em passar através da estrutura interna de um determinado corpo. No concreto, esta propriedade é medida pelo volume de água que passa através de corpos-de-prova.

A permeabilidade, juntamente com a absorção, são parâmetros importantes devido às suas relações com elementos agressivos que podem causar danos ao concreto.

"A permeabilidade do concreto à água depende principalmente da relação água/cimento (que determina o tamanho, volume e continuidade dos espaços capilares) e da dimensão máxima do agregado (que influencia as microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento" (FURNAS, 1997).

O método utilizado neste estudo é o da determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto pelo método de percolação da água sob pressão. O ensaio é feito utilizando-se corpos de prova cilíndricos, de relação altura/diâmetro igual a 1 (um), com diâmetros de 15 cm, 20 cm e 30 cm. O equipamento é o mesmo desenvolvido pelo Bureau of Reclamation. Na figura 7 está ilustrado o equipamento de ensaio.

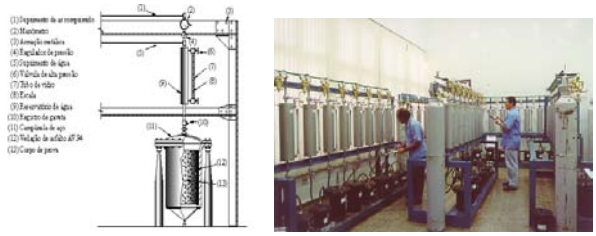

Figura 7. Equipamento para o Ensaio de Permeabilidade

Os resultados do ensaio de permeabilidade estão apresentados na figura 8 estão apresentados os resultados.

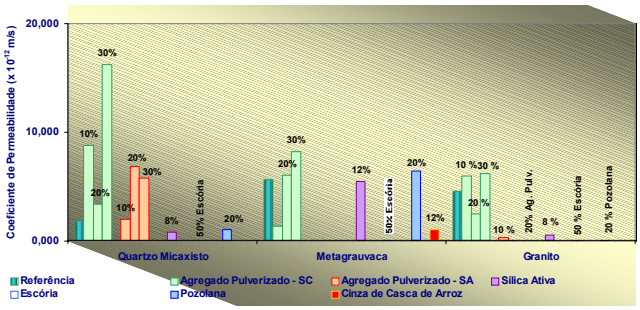

Figura 8. Permeabilidade com teores intermediários

O resultado do ensaio de permeabilidade mostrou que a escória com o teor de 50% apresentou o melhor comportamento, praticamente, no houve percolação.

A permeabilidade a água é reduzida com a adição de escória em concreto de cimento Portland , principalmente com o aumento da sua finura. Concretos com adição de escória com 453 m²/kg e 786 m²/kg de finura apresentaram coeficientes de difusão inferiores a 50% do obtido para o concreto de cimento Portland, ocorrendo uma queda significativa do coeficiente para a escória com 1160 m²/kg de finura. Isso ocorre devido a formação de uma estrutura de poros fina e descontínua com a deposição dos produtos da hidratação da

escória nos poros e canais existentes na pasta (NAKAMURA et al., 1992; BAUER, 1995). Para teores de escória elevados (85%) forma-se uma estrutura de poros fina, com grande quantidade de poros pequenos, mas com maior volume em relação as misturas de cimento Portland (TOMISAWA & FUJII, 1995).

IV. Considerações

Em termos gerais, na adição de sílica ativa, de cinza de casca de arroz (materiais ricos em sílica amorfa) bem como do metacaulim (contém aluminosilicato amorfo), foi observado um aumento do desempenho na resistência à compressão quando comparado com a referência.

A durabilidade, expressa através dos ensaios de permeabilidade, no caso deste estudo, mostrou que a escória de alto forno, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e a pozolana com quartzo micaxisto mostraram-se bastante eficientes no preenchimento dos grandes espaços capilares, reduzindo assim a permeabilidade do sistema.

A adição que apresentou maior eficiência quanto à resistência a percolação de água foi a escória de alto forno.

A adição de agregado pulverizado nos teores de 20% e 30% não contribuiu para melhorar a impermeabilidade do concreto, apresentando valores inferiores ao concreto de referência.

V. Referências bibliográficas

[1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto – estrutura, propriedades e materiais. São Paulo, Ed. PINI, 1994.

[2] NEVILLE, A.M. Propriedades do Concreto. São Paulo, Ed. PINI, 1997.

[3] MEHTA, P. K. & MALHOTRA, V. M. Pozzolanic and Cementitious Materials – Advances in concrete techoology. Amsterdam, 1996, v. 1.

[4] HASPARYK, N. P.; FARIAS, L.A.; ANDRADE, M.A.S; BITTENCOURT, R.M; ANDRADE, W.P. - Estudo da influência da cinza de casca de arroz amorfa nas propriedades do concreto. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Vitória-ES, 2003.

[5] LIDUÁRIO, A. S.; ANDRADE, M.A.; BITTENCOURT, R.M.; ANDRADE, W.P.-Estudo da influência de adições minerais e pozolânicas nas propriedades do concreto utilizando como agregado o quartzo micaxisto. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Foz do Iguaçu-PR, 2001.

[6] TRABOULSI, M. A.; FARIAS, L.A.; LIDUÁRIO, A.S.; ANDRADE, M.A.S; BITTENCOURT, R.M.; ANDRADE,W.P.-Influência de adições minerais e pozolânicas nas propriedades do concreto utilizando como agregado o tipo litológico metagrauvaca. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo-SP, 2003.

[7] ZHANG, M. & MALHOTRA, V. M. Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. Cement and Concrete Research, v. 25, n. 8, p. 1713-1725, 1995.

[8] WILD, S.; KHATIB, J. M; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. Cement and Concrete Research, v. 26, n. 10, p. 1537-1544, 1996.

[9] DUCHESNE, J. & BÉRUBÉ, M-A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR; another look at the reaction mechanisms Part 2: Pore solution chemistry. Cement and Concrete Research, v. 24, n. 2, p. 221-230, 1994b.

[10] FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades. São Paulo, Walton Pacelli de Andrade/PINI, 1997.

[11] DUCHESNE, J. & BÉRUBÉ, M-A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR; another look at the reaction mechanisms Part 1: Concrete expansion and portlandite depletion. Cement and Concrete Research, v. 24, n. 1, p. 73-82, 1994a.

[12] RAMACHANDRAN, V. S. Concrete admixtures handbook-Properties, science and technology. 2ª Ed., New Jersey: Noyes Publications, 1995, 1153 p.

[13] NAKAMURA, N.; SAKAI, M.; SWAMY, R. N. Effect of slag fineness on the development of concrete strength and microstructure. In: International Conference ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN COCRETE, 4., Instanbul, 1992. Proceedings. Detroid, American Concrete Institute, SP-132, 1993. P. 1343-1366.

[14] BAUER, E. Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas. São Paulo, 1995, 235p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[15] TOMISAWA, T. & FUJII, M. Effect of high fineness and large amounts of ground granulated blast furnace slag on properties and microstructure of slag cements. In: International Conference ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN COCRETE – 5., Winsconsin, 1995. Proceedings. Detroid, American Concrete Institute, SP-153, 1995. P. 951-973.