

APLICAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD À FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND CP III*

*Sidiney Nascimento Silva¹
André Tarcizo de Oliveira Vieira²
Marcel Demarco de Souza Oliveira³
Flávio Santos Correa⁴
Fernando Vernilli Junior⁵*

Resumo

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar, em escalas laboratorial e industrial, a viabilidade técnica e financeira da aplicação da escória de Aciaria LD (EAC), em combinação com a escória granulada de Alto-Forno (EAF), à produção de Cimento Portland CP III. O projeto de pesquisa em questão foi desenvolvido pela CSN, através de Convênio de Cooperação Técnica e Econômica com a Escola de Engenharia de Lorena, EEL, da Universidade de São Paulo, USP, e compreendeu as seguintes etapas: i) caracterização físico-química e mineralógica da escória de Aciaria LD da CSN; ii) desenvolvimento do processo adicional de beneficiamento da EAC para aplicação na produção de cimento; iii) testes laboratoriais visando a avaliar a viabilidade técnica; iv) testes industriais com a finalidade de validar os testes laboratoriais e selecionar a formulação de melhor desempenho; v) estudo de viabilidade financeira; e vi) implantação do projeto. A aplicação da escória de Aciaria LD da CSN na produção de Cimento Portland CP III, em combinação com a escória de Alto-Forno e clínquer, é viável técnica e financeiramente. Isso traz reflexos positivos para o aumento da competitividade do negócio Cimento, aumenta a recuperação de metálicos para reciclagem nos processos siderúrgicos da UPV (negócio Siderurgia) e reduz passivos ambientais.

Palavras-chave: Escória de aciaria LD; Cimento Portland.

BOF SLAG APPLICATION TO THE PORTLAND CEMENT PRODUCTION

Abstract

The main goal of the present paper was to evaluate, in lab and industrial scales, the technical and financial feasibility of BOF slag application, in combination with Blast Furnace slag, to the Portland cement production. This R&D project was developed in partnership with Escola de Engenharia de Lorena – EEL from Universidade de São Paulo – USP, comprising the following steps: i) physic-chemical and mineralogical characterization of BOF slag; ii) development of an additional process of BOF treatment for cement production; iii) lab tests in order to evaluate preliminarily the technical feasibility; iv) industrial trials to validate lab tests and assess the formulation of the best performance; v) financial feasibility study; and vi) project implementation. CSN BOF slag application to the Portland cement production, in combination with Blast Furnace slag and clinker, is feasible technically and financially. This has some positive impacts on the competitiveness of cement business: i) increases metallic recovering from BOF slag to be recycled at CSN metallurgical processes (steel business) and ii) reduces environmental problems.

Keywords: BOF slag; Portland cement.

¹ Eng. Civil, Ph.D., Gerente de Processos da Metalurgia, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Eng. Químico, Coordenador de Projetos Especiais, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Eng. Químico, Supervisor de Garantia da Qualidade, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁴ Eng. Civil, Gerente de Produção de Cimentos, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁵ Eng. Químico, Ph.D., Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

A elevação de um resíduo industrial à categoria de fonte alternativa de recurso mineral requer a adoção de uma metodologia de qualificação, baseada nas políticas ambientais de classificação, na caracterização e no estudo de viabilidade técnica e econômica da aplicação desses resíduos [1].

Devido à compatibilidade química, materiais alternativos, tais como, resíduos industriais, subprodutos e outros, podem ser aplicados à fabricação de cimento. Estudos encontrados na literatura [3] apontam para a utilização combinada de escória granulada de Alto-Forno e escória de Aciaria LD, como matérias-primas para a produção de cimento.

Montgomery e Wang [4] também estudaram o uso combinado da escória de Aciaria LD, escória granulada de Alto-Forno e clínquer na fabricação do cimento. De acordo com esses pesquisadores, o CaO livre, presente na escória de Aciaria LD, pode ser absorvido pelas escórias de Alto-Forno, reduzindo assim, a expansão volumétrica esperada para o cimento. O excesso de CaO da escória de Aciaria LD pode agir favoravelmente nas propriedades hidráulicas da escória de Alto-Forno atuando como um ativador.

De acordo com Sun et al. [5], as escórias de Aciaria podem ser consideradas como um clínquer de Cimento Portland de baixa qualidade. Os cimentos produzidos com escória de Aciaria apresentaram uma elevação da resistência à compressão ao longo do tempo, superior à dos cimentos convencionais.

Dongxue et. al. [6] e Shi e Qian [7] também relataram sobre a produção comercial de cimentos, utilizando-se escórias de Aciaria LD, produzidas com baixas taxas de resfriamento, ou seja, com baixo grau de vitrificação. Segundo Dongxue et al., esses cimentos são fabricados com a mistura de escória de Aciaria LD, escória granulada de Alto-Forno, clínquer, gesso e adições.

No Brasil ainda há poucas referências com relação à aplicação da escória de Aciaria LD à fabricação de cimento. Todavia, nos demais países cerca de 3% da geração da escória de Aciaria são empregados na fabricação do Cimento Portland, Figura 1.

Sob essa perspectiva, a CSN possui uma condição ímpar em termos de vantagem competitiva para a produção de Cimento Portland de Alto-Forno CP III (Tabela 1): i) o clínquer é produzido em Arcos, MG, onde a CSN possui uma mina de calcário; ii) a Fábrica de Cimento, projeto moderno e atualizado, com elevado nível de automação e de produtividade, é instalada no mesmo “site” da Usina Presidente Vargas, UPV, usina siderúrgica integrada, que possui 2 Altos-Fornos, com capacidade de geração anual ao redor de 1,6 Mt de escória granulada de Alto-Forno e de 0,6Mt de escória de Aciaria LD; iii) A UPV está estrategicamente localizada em Volta Redonda, RJ, próxima aos maiores centros consumidores de cimento da região sudeste do Brasil.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo avaliar, em escalas laboratorial e industrial, a viabilidade técnica e financeira da aplicação da escória de Aciaria LD (EAC), em combinação com a escória granulada de Alto-Forno (EAF), à produção de Cimento Portland CP III. O projeto de pesquisa em questão foi desenvolvido pela CSN, através de Convênio de Cooperação Técnica e Econômica com a Escola de Engenharia de Lorena, EEL, da Universidade de São Paulo, USP, e compreendeu as seguintes etapas: i) caracterização físico-química e mineralógica da escória de Aciaria LD da CSN; ii) desenvolvimento do processo adicional de beneficiamento da EAC para aplicação na produção de cimento; iii) testes laboratoriais visando a avaliar a viabilidade técnica; iv) testes industriais com a

finalidade de validar os testes laboratoriais e selecionar a formulação de melhor desempenho; v) estudo de viabilidade financeira; e vi) implantação do projeto.

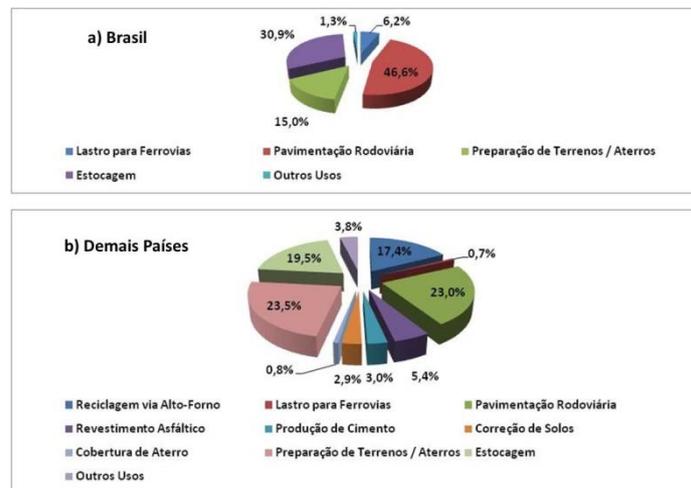


Figura 1. Aplicação da escória de Aciaria [IBS, 2004].

Tabela 1. Características de qualidade do cimento portland de Alto-Forno.

Características de Qualidade do Cimento								
Tipo	Classes			Composição (% em peso)				Norma Brasileira
	Resistência à Compressão (MPa)			Clinker + Gesso	Escória de Alto-Forno	Pozolana	Filler	
CP III	25	32	40	25 - 65	35 - 70	0	0 - 5	ABNT-NBR-5735

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização das Principais Propriedades Físico-Químicas e Mineralógicas da Escória de Aciaria LD

As escórias de Aciaria LD (EAC) e de Alto-Forno (EAF) possuem composições químicas bastante distintas, conforme mostrado na Tabela 2. A EAC possui uma basicidade binária [%CaO/%SiO₂], de 3,77, superior ao triplo da basicidade da EAF, de 1,15.

A escória de Aciaria LD é resfriada ao ar livre, com uma baixa taxa de resfriamento, levando à formação de um elevado volume de fases cristalinas, resultando em um material com baixo índice de vitrificação, sem propriedades hidráulicas latentes. Em adição, devido à presença de CaO e MgO livres em sua composição, a escória de Aciaria LD ainda apresenta riscos de expansão volumétrica, decorrentes da hidratação desses compostos, Equações 1 e 2. A cinética da reação de hidratação do MgO, Equação 2, é mais lenta, em comparação ao CaO, dificultando o processo de estabilização volumétrica. Esse problema tem sido agravado nos últimos anos com a implantação da tecnologia de “slag splashing” nas Aciarias LD: saturação da escória dos Conversores LD em MgO e projeção, com auxílio da lança de oxigênio, sobre o revestimento refratário, para protegê-lo contra a corrosão.

Tabela 2. Composição química típica das escórias de Aciaria LD e de Alto-Forno da CSN (Referência: 2012-2013).

Escória de Aciaria LD									
Composição Química	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Basicidade Binária	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S
Valor Médio	1,08	12,55	44,34	11,5	3,77	25,74	4,29	3,16	0,05
Desvio Padrão	0,35	1,77	2,4	1,76	0,6	4,18	0,59	0,97	0,02
Escória de Alto-Forno									
Composição Química	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Basicidade Binária	Fe	TiO ₂	S	
Valor Médio	13,18	36,4	41,79	4,75	1,15	0,18	0,51	0,34	
Desvio Padrão	0,88	1,34	1,75	0,42	0,77	0,06	0,16	0,13	

Por outro lado, a EAF é granulada sob a ação de um jato de água de elevada pressão, com uma elevada taxa de resfriamento. Isso leva ao congelamento da sua microestrutura amorfa, resultando em um material com elevado índice de vitrificação, com excelentes propriedades hidráulicas, contribuindo diretamente para a elevação da resistência mecânica do cimento.



Dessa forma, a 1.^a etapa do projeto compreendeu a caracterização das principais propriedades físico-químicas e mineralógicas da escória de Aciaria LD da CSN, realizada pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, Brasil.

2.2. Testes laboratoriais

A Tabela 3 apresenta as formulações (receitas), em peso, base seca, utilizadas para os testes laboratoriais de aplicação da EAC na produção de Cimento Portland CP III. Para efeito de uniformização da reatividade, todas as formulações foram processadas em um moinho de bolas até atingir uma superfície específica (“blaine”) na faixa de 4.200 a 4.500 cm²/g.

Corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro x 100 mm foram moldados, tratados em câmara úmida durante 24 horas, com umidade superior a 95% e imersos em tanque de cura com água saturada em cal, durante 1, 3, 7 e 28 dias, conforme NBR-7215. Após cura, os corpos de prova das diversas formulações de cimento foram caracterizados conforme: (a) Resistência mecânica à compressão (R1, R3, R7 e R28) – ABNT-NBR-7215 e (b) Expansibilidade a quente pelo método Le Chatelier – ABNT-NBR-11582.

Tabela 3. Formulações utilizadas para os testes laboratoriais de aplicação de escória de Aciaria LD na produção de cimento.

Receita - Base Seca (%)						
Formulações	Escória de Aciaria LD (EAC)	Escória de Alto-Forno (EAF)	Clinker (CLK)	Calcário (CAL)	Gesso (GES)	Alteração
CP III REF LAB	0	63	30	5	2	Referência ("branco")
A1L	5	63	30	0	2	Substituição do CAL (5%) por EAC (%)
A2L	10	63	25	0	2	Substituição do CAL (5%) e CLK (5%) por EAC (10%)
A3L	10	60	28	0	2	Substituição do CAL (5%), CLK (2%) e EAF (3%) por EAC (10%)
A4L	10	58	30	0	2	Substituição do CAL (5%) e EAF (5%) por EAC (10%)

2.3. Beneficiamento da Escória de Aciaria LD para Aplicação na Produção Industrial de Cimento

De acordo com a literatura [1], a aplicação da EAC na produção industrial de cimento exigiu uma etapa adicional de beneficiamento. A escória passou por um novo processo de separação magnética primária, britagem, separação magnética secundária e classificação granulométrica, de forma a garantir uma granulometria 100% inferior a 5mm e minimizar o teor de Fe (fração metálica).

Apesar da existência de um separador magnético no fluxo de processo da Fábrica de Cimento, antes da etapa de moagem, um dos pontos chave do sucesso do processo de beneficiamento da escória refere-se à máxima remoção possível da fração metálica, em função dos riscos de danos ou redução da vida útil da mesa e dos rolos do moinho, com redução da disponibilidade do equipamento e, por conseguinte, perdas por lucro cessante (interrupção da produção). Sob essa ótica, quanto mais finamente é moída a escória, maior será a eficiência do processo de remoção da fração metálica, em função da maior desintegração das partículas finas de metal aderidas e aprisionadas pela escória. Essa maior eficiência do processo de separação magnética tem dois pontos extremamente positivos: (a) Aumento da fração metálica removida e (b) Redução do teor de Fe da escória e minimização dos riscos de danos aos rolos do moinho da Fábrica de Cimento.

2.4. Testes Industriais

A Tabela 4 apresenta as formulações (receitas), em peso, base seca, utilizadas para os testes industriais de aplicação de EAC na produção de Cimento Portland CP III. À semelhança dos testes laboratoriais, todas as formulações apresentaram uma superfície específica ("blaine") na faixa de 4.200 a 4.500 cm²/g.

Tabela 4. Formulações utilizadas para os testes industriais de aplicação de escória de Aciaria LD na produção de cimento.

Receitas - Base Seca (%)						
Formulações	Escória de Aciaria LD (EAC)	Escória de Alto-Forno (EAF)	Clinquer (CLK)	Calcário (CAL)	Gesso (GES)	Alteração
CP III REF IND	0	63	30	5	2	Referência ("branco")
A1I	5	63	30	0	2	Substituição do CAL (5%) por EAC (%)
A2I	8	61	29	0	2	Substituição do CAL (5%), CLK (1%) e EAF (2%) por EAC (8%)
A3I	10	60	28	0	2	Substituição do CAL (5%), CLK (2%) e EAF (3%) por EAC (10%)
A4I	10	58	30	0	2	Substituição do CAL (5%) e EAF (5%) por EAC (10%)

Novamente, corpos de prova foram moldados e caracterizados com relação à resistência mecânica à compressão e expansibilidade conforme item 3.2. A distribuição granulométrica também foi caracterizada por sedigrafia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização das Principais Propriedades Físico-Químicas e Mineralógicas da Escória de Aciaria LD

A Tabela 5 apresenta os resultados das caracterizações das principais propriedades físico-químicas e mineralógicas da escória de Aciaria LD da CSN.

3.2. Testes Laboratoriais

A Figura 2 ilustra os resultados de resistência mecânica à compressão das diversas formulações testadas em escala laboratorial, incluindo a sua variação com relação à formulação de referência, sem adição de EAC, “branco” (CP III REF LAB).

A adição da EAC resultou em uma perda das resistências iniciais do cimento – R1, R3 e R7 (variação negativa). A amostra A1L, com substituição de 5% de calcário (CAL) por EAC, foi a formulação que apresentou a menor perda das resistências iniciais. As formulações com substituição de clínquer (CLK) e EAF por EAC (CP III A2L, A3L e A4L) apresentaram as maiores perdas das resistências iniciais [2].

A amostra A2L, com substituição de 5% de CLK por EAC (5%), a resistência do cimento a 7 dias (R7), 22,5 MPa, é inferior ao valor mínimo exigido pela norma ABNT, 23,0 MPa. Em contrapartida, a adição da EAC resultou em ganhos significativos da resistência do cimento na idade de 28 dias (R28) para todas as formulações testadas. Esses resultados confirmam as pesquisas realizadas por SUN et al., 1993. A amostra A3L, com substituição de 5% de CAL, 2% de CLK e 3% de EAF por EAC (10%), apresentou o maior ganho de resistência a 28 dias (R28), de 17,3%. Esses resultados sinalizam que a cinética de reação da escória de Aciaria LD é lenta.

O mecanismo de atuação da EAC para o aumento da resistência do cimento ainda não é claramente explicado na literatura técnica. De acordo com MONTGOMERY e WANG, 1991, o excesso de CaO presente na EAC pode agir favoravelmente nas propriedades hidráulicas da EAF, atuando como um ativador. Todavia, as hipóteses mais prováveis são atribuídas à presença de CaO livre e/ou à elevada basicidade da EAC, que contribuem para a formação das fases belita, C_2S ($2CaO.SiO_2$) e alita, C_3S ($3CaO.SiO_2$). Essas hipóteses são objetos de um projeto atual de P&D desenvolvido através de Convênio de Cooperação Científica, Tecnológica e de Inovação, firmado em 2013 entre a CSN e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

A adição da EAC, provavelmente em decorrência das reações de estabilização volumétrica do CaO e MgO livres, presentes em sua composição, promove um aumento da expansibilidade do cimento, Figura 3. Todavia, os valores de expansibilidade, de todas as formulações testadas, são inferiores ao limite máximo especificado pela ABNT, de 5,0mm. À medida que se aumenta as concentrações de EAC e CLK nas formulações, há uma elevação também do percentual de expansibilidade.

Tabela 5. Caracterização das Propriedades Físico-Químicas e Mineralógica da Escória de Aciaria LD da CSN.

Caracterização da Escória de Aciaria LD da CSN (ABCP).												
Composição Química (%)												
Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	CaO livre	MgO	Índice de Estabilidade Volumétrica do MgO(*)	Basicidade Binária	FeO	MnO	SO ₃	RI	Perdas ao Fogo	
3,52	11,55	41,21	5,66	8,06	0,42	3,56	25,86	4,00	0,16	5,33	0,63	
Composição Mineralógica - Difratometria de Raios-X												
Fase		Fórmula		Frequência Relativa (Intensidade)								
CaO livre		CaO		Pouco frequente								
Portlandita		Ca(OH) ₂		Presente								
Calcita		CaCO ₃		Presente								
Silicato de Cálcio		2CaO.SiO ₂		Frequente								
Ferrita de Cálcio		2CaO.Fe ₂ O ₃		Frequente								
Wustita		FeO		Frequente								
Grau de Vitrificação e Natureza da Escória												
Grau de Vitrificação (%)		Índice de Refração (n)		Natureza(*)								
0		Isenta										

* Contribuição técnica ao 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

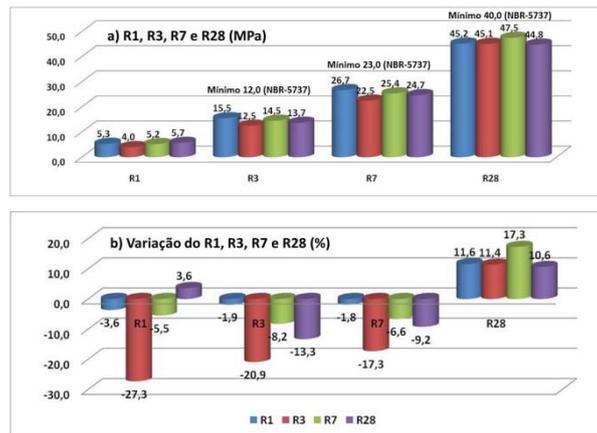


Figura 2. Resultados de R1, R3, R7 e R28 das diversas formulações testadas em escala laboratorial.

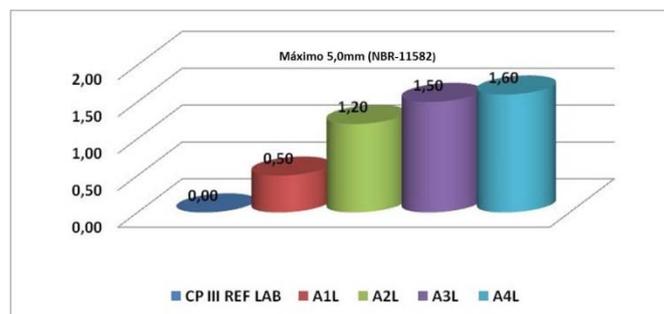


Figura 3. Resultados de expansibilidade – método Le Chatelier, das diversas formulações testadas em escala laboratorial.

3.3. Testes Industriais

3.3.1. Fração metálica contida na escória de Aciaria LD

Não houve alteração significativa dos parâmetros de processo da produção de cimento com a adição da EAC, todavia vale destacar os efeitos colaterais negativos do aumento da concentração de Fe metálico na moagem: i) aumento da potência média do motor do moinho, de 3.890 para 4.192 kW e ii) elevação da corrente do elevador de recirculação – retroalimentação.

3.3.2. Distribuição granulométrica

O diâmetro médio das diferentes formulações situou-se ao redor de 12 - 14µm, sinalizando que não houve alteração significativa da granulometria do cimento (superfície específica), em função da adição da EAC à receita.

3.3.3. Resistência mecânica

Os resultados dos testes industriais, Figura 4, validaram os resultados dos testes laboratoriais. À semelhança dos testes laboratoriais, a adição da EAC resultou em uma perda das resistências iniciais do cimento – R1, R3 e R7 (variação negativa). A amostra A3I, com substituição de 5% de calcário (CAL), 2% de CLK e 3% de EAF por 10% de EAC, foi a formulação que apresentou a menor perda das resistências iniciais.

As formulações com substituição de clínquer (CLK) e escória de Alto-Forno (EAF) por EAC (A2I, A3I e A4I) apresentaram as maiores perdas das resistências iniciais, todavia todas elas atenderam aos valores mínimos exigidos pela norma ABNT para

cada idade. Observou-se também nos testes industriais, que a adição da EAC resultou em ganhos significativos da resistência do cimento na idade de 28 dias (R28) para todas as formulações testadas. A amostra A4I, com substituição de 5% de CAL e 5% de EAF por EAC (10%), apresentou o maior ganho de resistência a 28 dias (R28), de 10,8%. Esses resultados sinalizam novamente que a cinética de reação da escória de Aciaria LD é lenta.

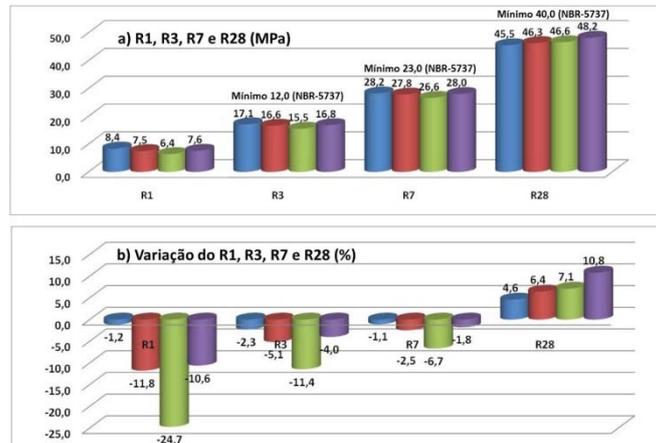


Figura 4. Resultados de resistência mecânica à compressão das diversas formulações testadas em escala industrial (R1, R3, R7 e R28).

3.3.4. Expansibilidade

A adição da EAC, à semelhança dos testes laboratoriais, Figura 5, também promoveu um aumento dos resultados de expansibilidade do cimento. Entretanto, todos os valores de expansibilidade, de todas as formulações testadas, foram inferiores ao limite máximo especificado pela ABNT, de 5,0mm. Repetiu-se aqui também, o fato de que à medida que se aumenta as concentrações de EAC e CLK nas formulações, há também uma elevação do percentual de expansibilidade.

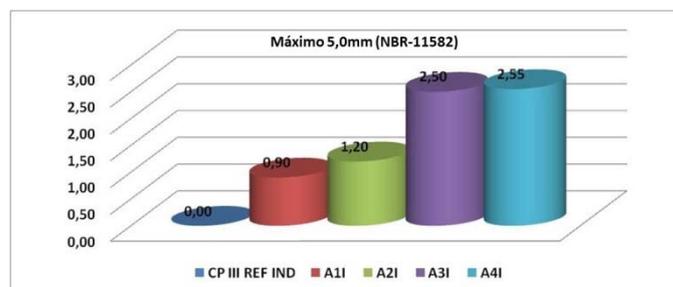


Figura 5. Resultados de expansibilidade – método Le Chatelier, das diversas formulações testadas em escala industrial.

3.3.5. Estudo de viabilidade financeira

A adição de 10% de EAC (180kta) em substituição a 2% de CLK e 8% de EAF, na produção do cimento CP III ensacado (1,8Mta), resulta em uma redução dos custos de produção do cimento de R\$ -3,51 / t, totalizando R\$ 6,31 milhões/ano, descontando-se os custos adicionais dos serviços de beneficiamento da EAC. Todavia, o consumo da EAC implica em aumento dos custos de manutenção – redução da vida útil da mesa e rolos do moinho, e perdas por lucro cessante decorrentes do aumento do número de paradas para manutenção, de cerca de R\$ 0,98 milhão / ano. O saldo líquido para a Fábrica de Cimento é uma redução de custos da ordem de R\$ 5,34 milhões / ano.

Por outro lado, o beneficiamento da EAC (180kta), com uma granulometria mais fina (máximo 5 mm), possibilita um aumento da recuperação de metálicos contidos na escória, da ordem de 16kta. Em função do elevado valor agregado da sucata metálica, isso representa uma redução dos custos de produção da Usina ao redor de R\$ 11,47 milhões / ano. Portanto, o resultado financeiro potencial da aplicação da EAC na produção de cimento Portland (180kta) é da ordem de R\$ 16,81 milhões / ano.

3.3.6 Implantação do projeto

O beneficiamento da EAC para a produção de cimento iniciou-se em 2013, utilizando-se as instalações da Planta de reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição existente na própria Usina (RCD), entretanto a sua capacidade é muito reduzida. Portanto, a implantação do projeto iniciou-se com volumes muito baixos e o aumento da escala, previsto para 2015, depende da contratação dos serviços adicionais de beneficiamento da EAC.

4. CONCLUSÕES

A aplicação da escória de Aciaria LD da CSN na produção de Cimento Portland CP III, em combinação com a escória de Alto-Forno e clínquer, é viável técnica e financeiramente. Isso traz reflexos positivos para o aumento da competitividade do negócio Cimento, aumenta a recuperação de metálicos para reciclagem nos processos siderúrgicos da UPV (negócio Siderurgia) e reduz passivos ambientais. De acordo com a literatura [8,9], a substituição de 2% de clínquer e 2% de calcário com a adição da escória de aciaria LD resulta numa redução de 9,6% da emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, ou seja, 470.610 toneladas de CO₂. Não houve alteração significativa dos parâmetros de processo da produção de cimento com a adição da escória de Aciaria LD. Todavia, ficou clara a importância da melhoria do processo de beneficiamento da escória, que requer metodologia de qualificação, no sentido de otimizar a remoção de metálicos.

REFERÊNCIAS

- 1 Rocha, T. B. Estudo das propriedades de cerâmicas refratárias formuladas com resíduos industriais. Trabalho de graduação (Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Aveiro, Portugal, 2005.
- 2 Fang, H.; Smith, J.D.; Peaslee, K.D. Study of spent refractory waste recycling from metal manufacturers in Missouri. Resources, Conservation and Recycling, 25, p.111–124, 1999.
- 3 Wulfert, H; Keissner, M; Ludwig, H. M. Metal recovery and conversion of steel slag unto highly reactive cement components. ZKG International (Deutsch, Englische Ausgabe, 1995), N. 9, p.34-40, 2013.
- 4 Montgomery, D.G. Wang, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. In: Material Forum, 1991.
- 5 Sun, S.; Jianhua, W.; Guilin, Z.; Youngjun, L. Steel slag cement. In: Mac Master Symposium Pretreatment and Reclamation of dust, sludge and scales in steel plants. Canada, 1993.
- 6 Dongxue, L.; Xinhua, F.; Xuequan, W.; Mingshu, T. Durability study of steel slag cement. Cement and Concrete Research, Elmsford. N.Y, V.27, n.7, p.983-87, 1997.
- 7 Shi, C.; Quian, J. High performance cementing materials from industrial slags – a review. Resources conservation & Recycling, V.29, p.1995 – 207, 2000.



- 8 Costa, E. B. Da; Nobre, T. R. S.; Gerreiro, A. Q.; Kirchheim, A. P.; Mancio, M.; Clínquer Portland com Reduzido Impacto Ambiental. *Ambiente Construído*, v.13, nº 2, p.75-86, 2013.
- 9 Worrel, E.; Price, L.; Martin, N.; Hendriks, C.; Meida, L. O.; Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review Energy and the Environment*, v.26, nº 1, p.1-10, 2011.