

UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE CONVERTEDOR NA FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND*

Luciana Cerqueira Souza Solimani¹
Wilton Pacheco de Araújo²
Mônica Marques Caetano de Lima³

Resumo

A geração de escória de aciaria (EAC) nas siderúrgicas é bastante significativa. Atualmente, na Usiminas, apenas 2,5% do agregado siderúrgico é vendido para a indústria cimenteira. Este trabalho visou caracterizar a escória e avaliar seu incremento na substituição à escória de alto-forno (EAF) na mistura do clínquer. Foram testados dois tipos de EAC e duas receitas distintas. As principais fases encontradas foram a larnita, portlandita, calcita, cal, ferritadicálcio e wustita, sendo a larnita em maior proporção. O teor de amorfo das amostras de EAC foi baixo, entre 24 e 30%. No entanto, a atividade pozolânica ficou acima de 75%. As amostras EAC não apresentaram diferença estatística significativa nos resultados de resistência à compressão em relação à referência, apresentando em alguns casos, ganho para os níveis de substituição (6 e 10%) após 180 dias de cura. Entre as receitas avaliadas, os maiores valores obtidos de resistência à compressão foram os da receita com maior proporção de EAF. Os resultados também mostraram que a resistência à compressão aumentou com o tempo de cura com tendência de estabilização após 180 dias. O estudo mostrou que é possível aumentar o percentual de uso de EAC substituindo a EAF na fabricação de cimento.

Palavras-chave: Escória de Convertedor; Aplicação; Cimento.

UTILIZATION OF LD SLAG FOR PORTLAND CEMENT

Abstract

The steel slag generation reaches expressive numbers worldwide. Around 2.5% of the steel slag commercialized is forwarded to cement production. The objective is to enhance the steel slag usage at cement production. Two types of LD slag samples were investigated. The mainly phases were belite, portlandite, calcite, lime srebrodowskite and wustite. Amorphous phases were about 24 – 30%, although the pozzolanic activity was more than 75%. The compressive strength essays showed that there were not statistic difference between the cement using LD slag and the reference, however in some cases presented higher compressive strength for 6 and 10% of substituting levels, especially for 180 days of curing. Among formulations tested, higher compressive results were obtained for higher BF slag proportion. The results showed that it is possible to increase LD slag usage on cement production.

Keywords: LD Slag; Cement; Application.

¹ Química, Doutorado, Pesquisadora, Centro de Pesquisa, Usiminas, Ipatinga-MG, Brasil

² Engenheiro Químico, Mestrado, Pesquisador, Centro de Pesquisa, Usiminas, Ipatinga-MG, Brasil

³ Engenheira Química, Mestrado, Pesquisadora, Centro de Pesquisa, Usiminas, Ipatinga-MG, Brasil

1 INTRODUÇÃO

O uso de escória de alto-forno (EAF) já é bem difundido para a produção do cimento CP-III. Já a escória de aciaria (EAC), apesar de existirem aplicações diversas no Brasil e no mundo, sua destinação ainda é muito restrita para a Usiminas. As aplicações mais comuns são para base e sub-base para pavimentação de estradas, lastro ferroviário, aplicação agrícola, artefatos de concreto, entre outros. A geração de escória de aciaria é significativa, em média, 12% da produção do aço bruto.

Algumas características da EAC são favoráveis à utilização na fabricação do cimento devido à presença de cálcio, silício, magnésio e alumínio, apesar de possuir elementos indesejáveis, tais como fósforo, ferro e cromo. O cimento de escória de aciaria tem sido usado comercialmente na China por mais de 20 anos, representando aproximadamente 40% da produção total de escória [1,2]. Outros autores também relataram sobre a produção comercial de cimentos utilizando escória de convertedor (escória LD) produzidas com baixas taxas de resfriamento, ou seja, com baixo grau de vitrificação [3]. Segundo Dongxue [3], esses cimentos são fabricados com a mistura de escória de aciaria, escória de alto-forno, clínquer, gesso e adições.

No cimento, é importante que ocorram as reações hidráulicas necessárias para dar resistência. As fases C_2S e C_3S são essenciais ao cimento, de maneira a formar o silicato de cálcio hidratado que dá a propriedade desejada. O efeito de hidraulicidade está ligado à formação do CSH, conforme as equações 1 e 2.



Murphy et al. [4] verificaram que algumas escórias de aciaria possuíam limitadas propriedades cimentícias devido à falta de C_3S e à presença de wustita como fase dominante. Os óxidos CaO, MgO e MnO, em conjunto com o FeO, propiciam a formação de soluções sólidas de wustita, predominantes nas escórias de resfriamento lento. Estas soluções não possuem propriedades cimentícias e não combinam com os óxidos necessários à formação dos minerais hidráulicos.

Murphy et al. [4], em seus estudos, mostrou um aumento de 40% na resistência a compressão para argamassa com adição de 10%, em massa, de escórias de aciarias granuladas em relação às argamassas de referência para ensaios com idade de 35 dias. Para o teor de adição de 20% de escória, o aumento da resistência foi de 18% e, para o teor de adição de 40% de escória, a resistência à compressão apresentou 36% de redução.

Montgomery e Wang [5] citam o uso combinado da escória LD, escória de alto-forno e clínquer na fabricação de cimento composto. Eles descrevem que o CaO_{livre} nas escórias LD pode ser absorvido pela escória de alto-forno, reduzindo, desta forma, a instabilidade da escória. O excesso de CaO da escória LD pode intervir nas propriedades hidráulicas da escória de alto-forno, agindo como um ativador. A resistência do cimento composto é similar à do cimento comum, quando a quantidade de escória LD for no máximo 35% e a quantidade de clínquer for superior a 55% da massa total dos materiais empregados. Foi observado que a resistência do cimento decresce aproximadamente 5% para cada 10% de redução na quantidade de clínquer, quando este último é usado em proporções abaixo de 55%.

Na Usiminas a venda de escória de aciaria para fabricação de cimento é na ordem de 2.000 t/mês. Todavia, acredita-se que o consumo possa ser aumentado. Este

estudo visa analisar as propriedades da escória LD e avaliar o potencial de incremento na substituição da escória de alto-forno por escória de aciaria na mistura do clínquer para fabricação do cimento CPIII.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

2.1.1 Caracterização físico-química

Duas amostras de escória de aciaria (EAC) foram coletadas para a realização deste estudo: uma amostra coletada logo após sua geração - bica (EAC LD_B) e outra coletada na pilha após 6 meses de estocagem - pilha (EAC LD_P). As escórias coletadas sofreram um processamento de separação da fração magnética e classificação granulométrica. A fração coletada para este estudo foi a menor que 25,4 mm por conter maior teor de cálcio e menor teor de ferro metálico. As amostras foram secas em estufa a 60°C para retirada da umidade e moídas em moinho de anéis até atingir uma superfície específica em torno de 4200 cm²/g, e, em seguida, peneiradas em peneira de 200 mesh. A granulometria da amostra moída foi analisada no difratômetro a laser.

Para a caracterização física, as fases mineralógicas das amostras foram identificadas e quantificadas por difração de raios X utilizando o método de Rietveld. O grau de vitrificação das escórias foi determinado tendo como padrão interno 10% de LiF. A microestrutura da escória foi avaliada por microscopia ótica (MO) e eletrônica (MEV) com auxílio do espectrômetro de dispersão de energia (EDS) para identificação dos elementos. Para caracterização química, utilizou-se espectrômetro de fluorescência de raios-X. As espécies de ferro foram quantificadas por titulação.

Os métodos químico e físico aplicados para determinação da atividade pozolânica foram baseados nas normas ABNT NBR 5753[6] e ABNT NBR 5752[7], respectivamente. No método químico, para a avaliação de pozolanas, foram feitas misturas em diferentes proporções de clínquer e pozolana, e traçou-se uma curva de saturação do hidróxido, em função da alcalinidade. No método físico, a atividade pozolânica foi obtida pela relação, em porcentagem, da resistência à compressão axial aos 28 dias de argamassas moldadas somente com cimento e outra com cimento e material pozolânico.

2.1.2 Ensaio de resistência à compressão

As amostras de EAC LD foram adicionadas ao clínquer, variando a proporção de substituição de EAF na mistura e os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados para avaliar sua potencialidade para desenvolver propriedades cimentícias. Foram ensaiadas neste estudo duas formulações (receitas) distintas: uma com maior conteúdo de EAF e outra com menor conteúdo de EAF. Na receita 1, 4 níveis de substituição da EAF por EAC foram testados para uma referência 30% de EAF na massa, conforme a tabela 1. A fim de comparar as duas amostras de EAC bica e pilha, a receita 1 foi aplicada nas duas amostras. Na receita 2, foram testadas 2 níveis de substituição para uma referência de 55% de EAF somente para a amostra EAC LD_B.

Tabela 1. Formulações para avaliar a substituição de EAF por EAC. (CK = clínquer, EAF = escória de alto-forno, EAC = escória de aciaria. CAL = cal e GE = gesso)

| Receita 1 | | | | Receita 2 | | | | | | |
|-----------|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-----|----|--|
| Condição | CK | EAF | EAC | Condição | CK | EAF | EAC | CAL | GE | |
| | % | | | | % | | | | | |
| 1 | 70 | 30 | 0 | 1 | 35 | 55 | 0 | 5 | 5 | |
| 2 | 70 | 27 | 3 | 2 | 35 | 55 | 5 | 0 | 5 | |
| 3 | 70 | 24 | 6 | 3 | 35 | 50 | 10 | 0 | 5 | |
| 4 | 70 | 20 | 10 | | | | | | | |
| 5 | 70 | 15 | 15 | | | | | | | |

O adensamento das argamassas foram feitos em moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura em 4 camadas iguais, recebendo 30 golpes uniformes de um soquete a cada camada nos cilindros. Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram conservados em câmara úmida saturada e temperatura controlada ($21 \pm 2^\circ\text{C}$) para a cura inicial e, em seguida, foram desmoldados e submetidos à cura em água saturada de cal até as datas de ruptura, 7, 28, 90 e 180 dias para a receita 1. O tempo de cura foi prolongado neste caso, pois a finalidade era avaliar o efeito da substituição para um longo período de cura. Para os demais testes, os rompimentos ocorreram em 7 e 28 dias de cura com objetivo de avaliar a formulação com maior conteúdo de EAF na massa. Todos os ensaios propostos foram realizados com 4 repetições. Os resultados foram analisados estatisticamente por análise múltiplas de médias utilizando o software *StatgraphicsPlus* versão 5.1.

2.2 Resultados e discussão

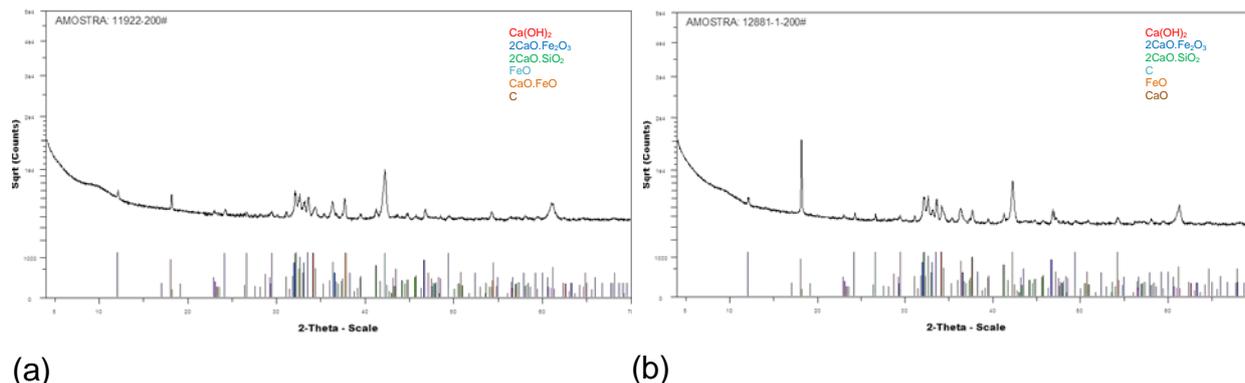
2.2.1 Caracterização físico-química

O resultado da superfície específica e tamanho das partículas obtido para as amostras de EAC, EAF e CK após a moagem e peneira de 200 mesh estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Resultado da superfície específica (cm^2/g) do passante em 200 mesh das amostras

| | EAC LD _B | EAC LD _P | EAF | CK |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|------|------|
| Densidade (g/cm^3) | 3,34 | 3,52 | 2,80 | 3,67 |
| Blaine (cm^2/g) | 3580 | 6730 | 2365 | 3390 |
| d 50 (μm) | 28,5 | 17,5 | 22,3 | 36,6 |
| d 90 (μm) | 81,8 | 64,2 | 65,7 | 93,7 |

As principais fases cristalinas presentes na amostra de EAC foram a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a srebrodolskita ($2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), a larnita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), fase importante para as reações hidráulicas, e a wustita (FeO), conforme difratogramas da figura 1. Outras fases de cálcio também foram identificadas como a calcita ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) e a cal (CaO). A cal se encontra dissolvida em uma solução sólida com FeO observado por microscopia óptica (figura 2) e na difração de raios X, muitas vezes não aparece de forma isolada, pois difrata na mesma posição do FeO como ocorreu na amostra EAC LD_B.



(a)

(b)

Figura 1. Difratoograma de raios X da amostra de EAC LD_B (a) e EAC LD_P (b).

A análise quantitativa das fases pelo método de Rietveld e o grau de amorfismo estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Resultados da análise quantitativa das fases

| Fases | EAC LD _B , % | EAC LD _P , % |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| | 11922 | 12881-1 |
| Portlandita | 14,8 | 4,38 |
| Larnita | 17,7 | 22,92 |
| Cal | 3,4 | 4,6 |
| Calcita | 10,03 | 2,2 |
| Srebrodolskita | 15,4 | 16,3 |
| Wustita | 14,2 | 16,5 |
| C grafite | NI | 1,2 |
| Amorfo | 24,28 | 31,71 |

Conforme já comentado, a fase predominante nas escórias de aciaria foi o C₂S (larnita ou belita), na ordem de 30%. Relembrando que a belita é responsável pela resistência a longo prazo no cimento enquanto que a alita pela resistência inicial. As fases de ferro também são bastante significativas nas amostras de EAC (15% de srebrodolskita e 15% de wustita). De maneira geral, a quantificação das fases por difração de raios X não é precisa devido à uma série de fatores que influenciam, tais como orientação preferencial na preparação das amostras, pela superposição de picos de diferentes fases, pela variação da composição dos minerais, além de aproximações matemáticas que podem causar erros.

O teor de amorfo encontrado nas amostras de escória de aciaria foi de 24 a 30%. O grau de amorfismo mínimo de materiais pozolânicos para fabricação de cimento é de 67%. Já a EAF normalmente possui um grau de amorfismo bem alto, acima de 95% enquanto que a EAC pode atingir 82%, quando resfriada bruscamente[8].

Na análise por microscopia óptica, percebe-se a presença de três fases bem características, como mostra a partícula da figura 2a: predomina-se a fase do C₂S, partículas de coloração cinza escuro e arredondadas; a fase rosada formada por solução sólida que contém ferro, conhecida por RO, podendo conter também outros elementos como Mg, Mn ou Ca; e a terceira fase bem comum em escória de aciaria de coloração cinza claro, contendo Ca e Fe, possivelmente a srebrodolskita (C₂F).

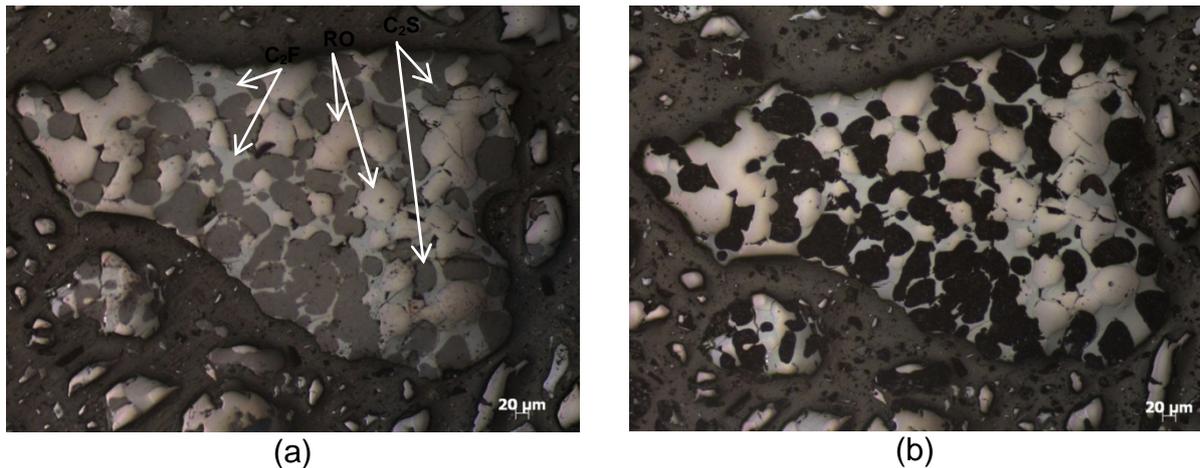


Figura 2. Fotomicrografia ótica de um campo de seção polida da amostra de EAC (a) e atacada com Nital (b).

Esta mesma partícula foi analisada também por MEV/EDS (figura 3). A partícula 1 da figura 3a trata-se da fase R-O, nesta fase a rede cristalina é substituída pelos elementos presentes que ora será Fe, Ca ou Mn. Já a partícula 2 trata-se da fase principal encontrada na escória que é o C_2S enquanto que a partícula 3, trata-se de uma matriz provavelmente do C_2F ou C_4AF , devido à presença de alumínio, como pode ser visto no EDS (figura 3d), porém esta fase não foi identificada por difração de raios X.

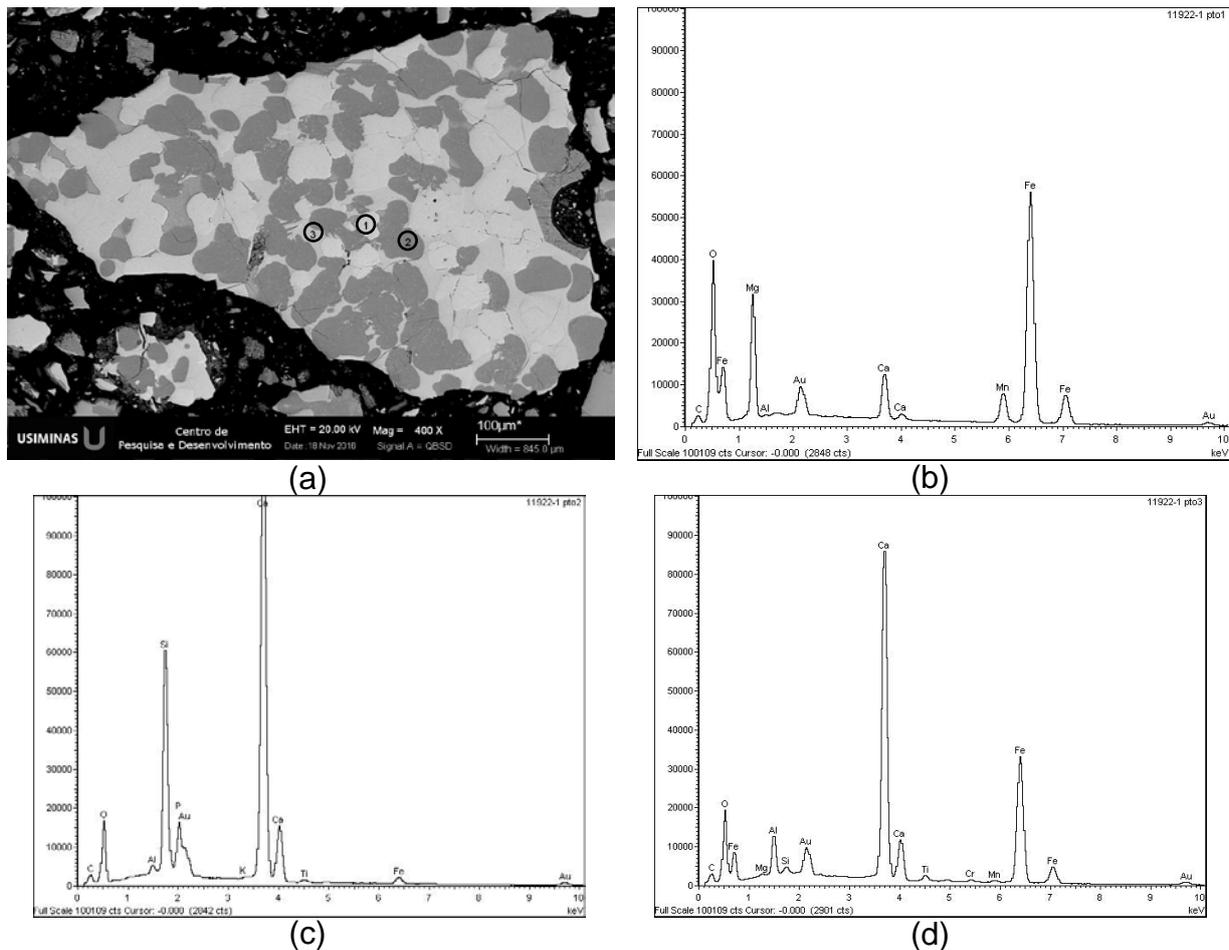


Figura 3. Fotomicrografia eletrônica da amostra de EAC (a) e o EDS das partículas 1 (b), 2 (c) e 3 (d).

A composição química das amostras de EAC, determinada por fluorescência de raios X, é basicamente de óxidos de cálcio, magnésio e silício, além de ferro, como está apresentada na tabela 4.

Tabela 4. Composição química por fluorescência de raios X das amostras de EAC

| EAC | CaO (%) | MgO (%) | SiO ₂ (%) | Fe T (%) | MnO (%) | P ₂ O ₅ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | TiO ₂ (%) | Cr ₂ O ₃ (%) | K ₂ O (%) |
|---------------------|---------|---------|----------------------|----------|---------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| EAC LD _B | 41,6 | 11,0 | 9,56 | 25,4 | 2,41 | 1,70 | 1,52 | 0,43 | 0,17 | 0,016 |
| EAC LD _P | 42,5 | 11,3 | 10,4 | 24,2 | 2,59 | 1,86 | 1,93 | 0,42 | 0,15 | 0,02 |

As espécies de ferro foram determinadas por via úmida e estão apresentadas na tabela 5. O teor de metálico foi muito baixo nas amostras. A quantificação do Fe₂O₃ foi estimada pela diferença do ferro total e as outras fases analisadas e encontra-se como 2CaO.Fe₂O₃ (C₂F), já identificado por difração de raios X.

Tabela 5. Resultado do teor de ferro (%) das amostras de escória

| Amostras | Fe T (%) | Fe met (%) | FeO (%) | Fe ₂ O ₃ (%) |
|---------------------|----------|------------|---------|------------------------------------|
| EAC LD _B | 26,7 | 1,39 | 17,1 | 17,2 |
| EAC LD _P | 23,1 | 1,53 | 16,4 | 12,6 |

2.2.2 Determinação da atividade pozolânica

As amostras não apresentaram atividade pozolânica pelo método químico aplicado. O método químico parece não ser o mais adequado para escória de aciaria por conter concentração de cálcio elevada na sua composição. Os métodos para determinação de um material pozolânico não devem ser avaliados de maneira isolada. Lea [8] defende que a pozolanicidade do material está associada ao estado vítreo, finura e composição química, embora não exista uma correlação entre estes parâmetros e a sua contribuição para a resistência. A tabela 6 mostra os resultados da atividade pozolânica avaliada pelo método físico.

Tabela 6. Índice de pozolanicidade das escórias – método físico

| Argamassa | Resistência à compressão (MPa) | Índice de pozolanicidade (%) |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 100% CK | 16,6 | 100 |
| 65% CK 35% EAF | 21,7 | 130,9 |
| 65% CK 35% EAC LD _B | 13,6 | 81,8 |
| 65% CK 35% EAC LD _P | 13,8 | 83,0 |

A EAF apresentou um índice de atividade pozolânica bem significativo de 130%, isto se deve ao fato de possuir fase amorfa que contribui para as reações hidráulicas de formação do CSH. Por este motivo que a EAF é amplamente utilizada na fabricação do cimento. Enquanto que as escórias de aciaria estudadas apresentaram menores valores de atividade pozolânica, porém maiores que o valor mínimo estipulado pela NBR 5736[10] de 75% para materiais pozolânicos. Dentre as escórias avaliadas, a EAC LD_P foi a que apresentou maior resistência apesar de serem consideradas estatisticamente iguais (figura 4).

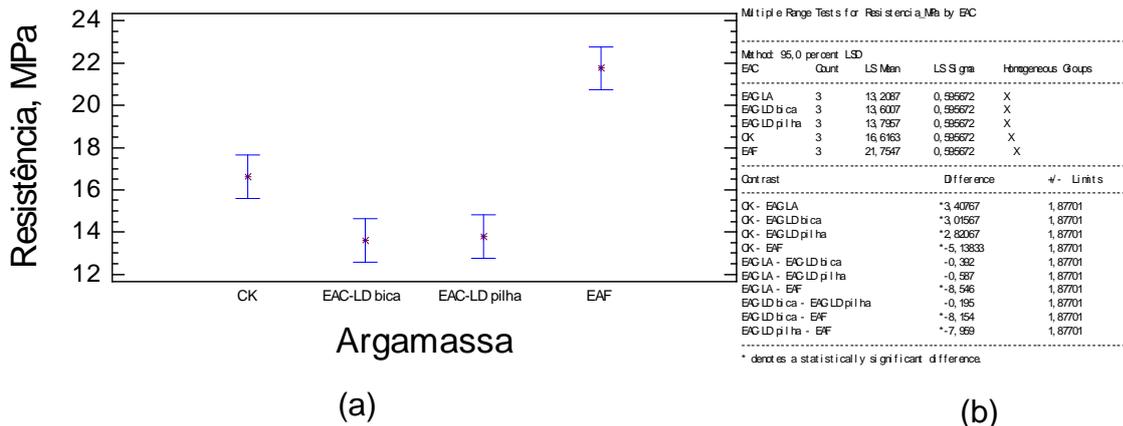


Figura 4. Resultado da resistência à compressão para o ensaio de determinação do índice de pozolanicidade (a) e análise comparativa de médias dos resultados para as amostras ensaiadas (b).

2.2.3 Ensaio de resistência à compressão

Receita 1 - EAC LD_B

Pela figura 5, é possível perceber que a resistência à compressão aumenta com o tempo de cura do material para todos os níveis de substituição testados. O maior ganho acontece entre o 7º e o 28º dia, havendo uma tendência de estabilização no 180º dia. Comparando os resultados de resistência à compressão entre os níveis de substituição e a referência para a mesma idade, observa-se que não houve diferença estatística a 95% de probabilidade, com exceção da idade de 90 dias (figura 6). Para o tempo de 90 dias de cura, a substituição de 6% apresentou um aumento na resistência, porém com a substituição por 3 e 10%, os resultados de resistência foram inferiores à referência. Acredita-se que o ganho de resistência quando do uso da escória de aciaria aconteça mais tardiamente devido às reações hidráulicas com a fase C₂S predominante na EAC ser mais lenta. Isto pode ser notado no maior valor obtido para a resistência a compressão para o tempo de cura de 180 dias nas substituições por 6 e 10%, apesar de não ter tido diferença estatística entre a referência e essas substituições (figura 6d).

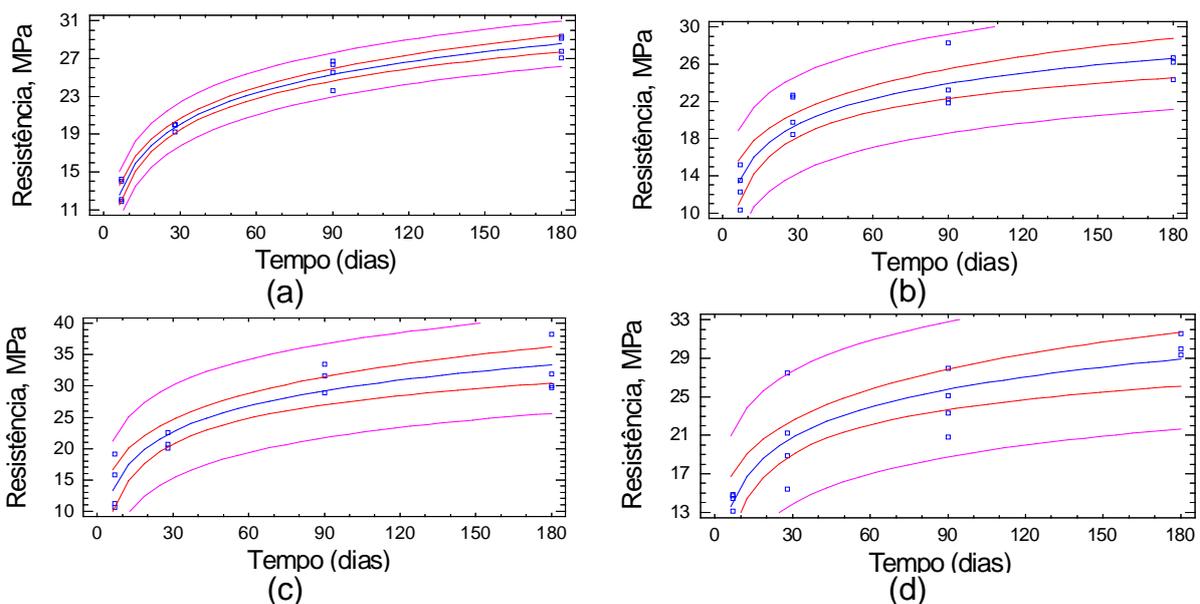


Figura 5. Resultado da resistência à compressão ao longo do tempo de cura para todas as condições de substituição (a) referência, (b) 3%EAC, (c) 6%EAC e (d) 10%EAC.

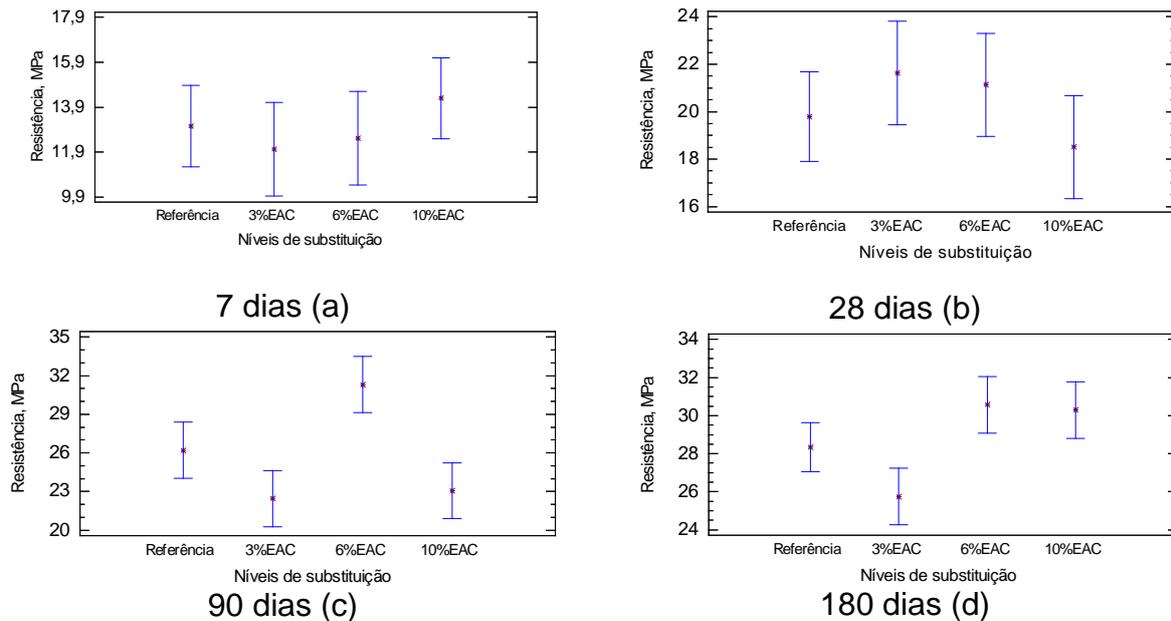


Figura 6. Resultado da resistência à compressão de todas as condições de substituição nos diferentes tempos de cura (a) 7 dias, (b) 28 dias, (c) 90 dias e (d) 180 dias. Receita 1 - EAC LD_P.

Diferente do que ocorreu para a amostra da bica (EAC LD_B), a amostra da pilha (EAC LD_P), apresentou uma melhora significativa no resultado de resistência quando a EAF foi substituída em 10 e 15% por EAC LD_P para 7 dias de cura, conforme mostra a figura 7a. Também foi observado um aumento na resistência para todos os níveis de substituição em 47 dias de cura. Já para 84 dias de cura, não houve diferença estatística significativa para os níveis de substituição avaliados.

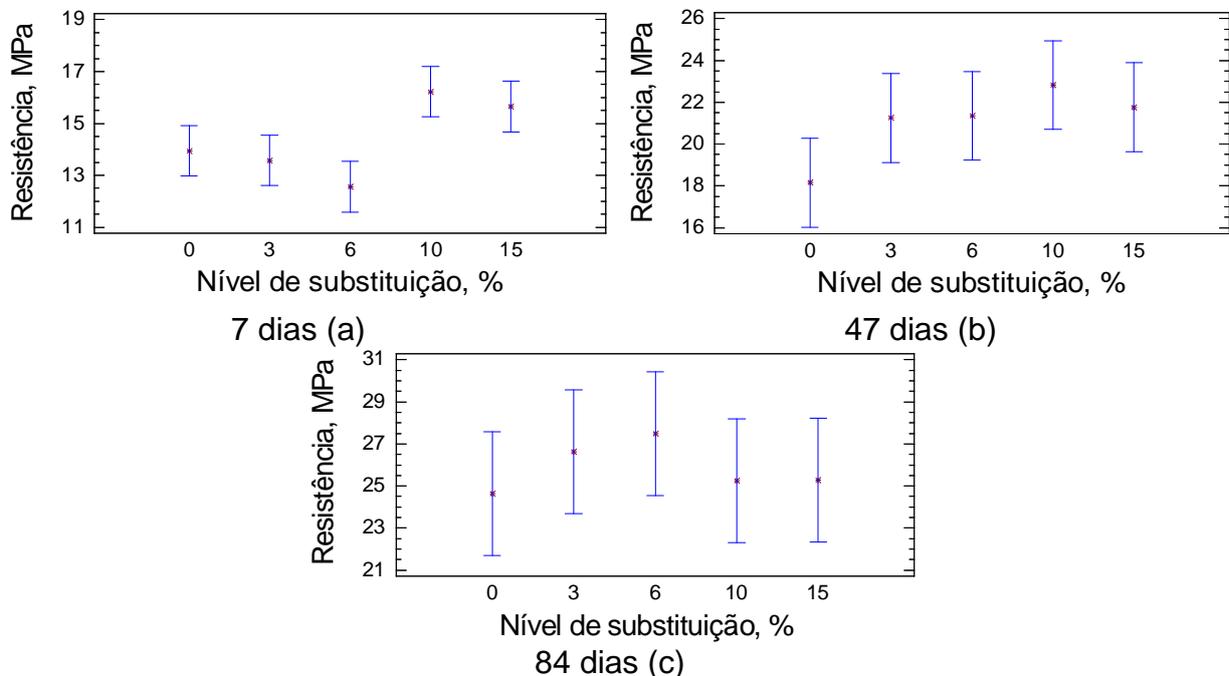


Figura 7. Resultado da resistência à compressão em todas as condições de substituição nos diferentes tempos de cura (a) 7 dias, (b) 47 dias e (c) 84 dias.

Receita 2 - EAC LD_B

A composição da receita 2 possui maior quantidade de escória de alto-forno (55%) quando comparada à receita 1 (30%). Quando a EAF foi substituída parcialmente por EAC LD_B, os resultados mostraram que não há diferença estatística significativa entre a referência e os níveis de substituição avaliados. No entanto, a média da resistência à compressão foi mais baixa para o maior nível de substituição (10%) para os dois tempos de cura avaliados (figura 8).

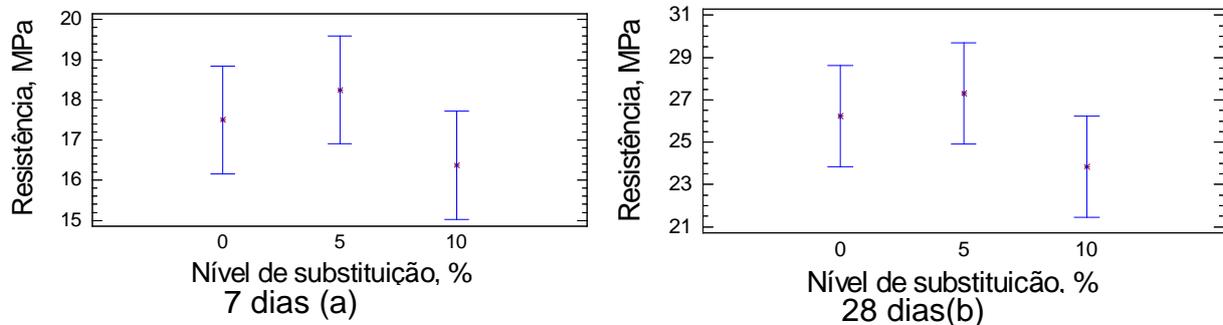


Figura 8. Resultado da resistência à compressão em todos os níveis de substituição nos diferentes tempos de cura (a) 7 dias e (b) 28 dias.

Como já observado anteriormente, o tempo de cura aumentou a resistência à compressão também utilizando a receita 2, como mostra a figura 9 e neste caso, os resultados atendem a especificação de resistência para cimentos Portland CPIII para 7 e 28 dias de cura[10].

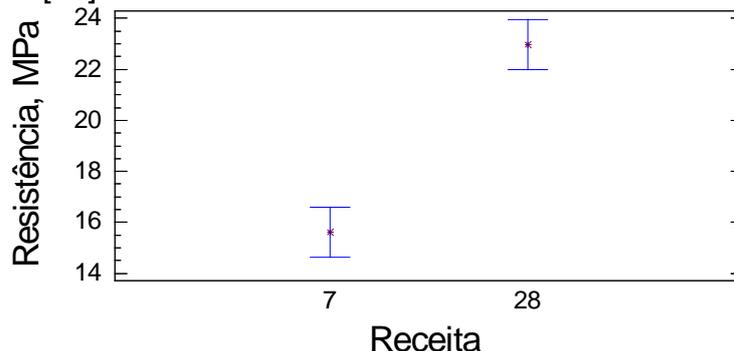


Figura 9. Resultado da resistência à compressão em todos os níveis de substituição nos diferentes tempos de cura 7 e 28 dias para a receita 2.

Uma avaliação comparativa das duas receitas para a EAC LD_B mostrou que a resistência à compressão para a receita 1 foi menor que para a receita 2 (figura 10). Isto mostra que o maior conteúdo de escória de alto-forno contribui para o aumento da resistência de maneira significativa devido à sua propriedade pozolânica.

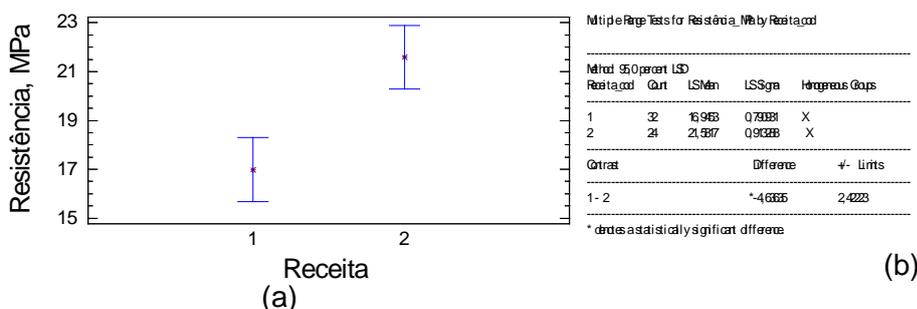


Figura 10. Resultado da resistência à compressão para a receita 1 e 2 (a) e análise de variância entre as duas receitas para a mesma amostra (b).

3 CONCLUSÃO

Foram testados dois tipos de EAC provenientes do convertedor LD: bica e pilha. As duas amostras de EAC LD avaliadas apresentaram características muito semelhantes. As principais fases encontradas nas escórias foram larnita, portlandita, calcita e cal, além das fases de ferro: ferritadicalcio (srebrodolskita) e wustita. Em termos quantitativos, a fase que está em maior proporção é a larnita, importante para as reações hidráulicas. Foi determinado também o teor de amorfo a partir da análise quantitativa pelo método de Rietveld e as amostras de EAC apresentaram teor de amorfo entre 24 a 30%, valor bem baixo quando comparado a EAF (>95%).

As escórias não apresentaram atividade pozolânica pelo método químico aplicado, porém pelo método físico todas as amostras apresentam atividade maior que 75%, sendo considerado material pozolânico, segundo a norma NBR 5736.

Os ensaios de resistência à compressão axial realizados nas argamassas substituindo parcialmente a EAF por EAC mostraram que não houve diferença estatística significativa entre as amostras ensaiadas para as mesmas condições de níveis de substituição (até 15%) e tempo de experimento, quando foi utilizada a receita com maior percentual de clínquer. As amostras EAC LD não apresentaram diferença estatística significativa em relação à referência na maioria dos casos, embora tenha ocorrido ganho de resistência para os níveis de substituição de 6 e 10% após 180 dias de experimento para a amostra EAC LD_B. No caso da amostra EAC LD_P, o ganho de resistência foi para os níveis de substituição de 10 e 15% e 7 dias de experimento. Também não houve diferença estatística significativa nos resultados de resistência à compressão até 10% de substituição para a receita com menor percentual de clínquer realizada com a amostra EAC LD_B. Entre as receitas avaliadas, os maiores valores de resistência à compressão obtidos foram para a receita com maior percentual de EAF. Os resultados também mostraram que em todos os casos, a resistência à compressão aumentou com o tempo de experimento, com tendência de estabilização após 180 dias.

REFERÊNCIAS

- 1 Shi C; Day RL. Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends. *Adv. Cem. Res.* 1999; 11 (4): 189-196.
- 2 Tsakiridis P, Papadimitriou GD, Tsvilis S, Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials.* 2008; 152: 805-811.
- 3 Dongxue L, Xinhua F, Xuequanand W, Mingshu T. Durability study of steel slag cement. *Cement and Concrete Research.* 1997; 27 (7): 983-987.
- 4 Murphy J N, Meadowcroft T R, Barr PV. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. *Canadian Metallurgical Quarterly.* 1997, 5(36): 315-331.
- 5 Montgomery DG, Wang G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. *Materials Forum.* 1991a, 15: 374-382.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5753. Cimentos – Método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico. 1991.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752. Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento. 1992.
- 8 Alexandre J, Raguin J. Beneficiation of blast furnace slag and converter slag in the French iron and steel industry In: *International Iron and Steel Institute*, 1984, section A2, p.1-21.

- 9 Lea FM. The chemistry of cement and concrete. 3ªed. London: Edward Arnold Ltd., 1970.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736. Cimento Portland pozolânico. 1991.