



AVALIAÇÃO DA LAMA VERMELHA DA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE ALUMÍNIO COMO MATERIAL POZOLÂNICO PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL

Eliz P. Manfroi (1); Malik Cheriaf (2); Janaide C. Rocha (3)

- (1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Laboratório ValoRes – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: elizmanfroi@yahoo.com.br
- (2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Laboratório ValoRes – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: ecv1mch@ecv.ufsc.br
- (3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Laboratório ValoRes – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: ecv1jcr@ecv.ufsc.br

RESUMO

A indústria de alumínio produz a lama vermelha como um de seus subprodutos. Este resíduo, que por sua vez necessita de uma disposição final, é depositado em extensas áreas, em forma de lagoas, podendo causar contaminação dos solos e dos aquíferos. Neste estudo foi analisado o potencial pozolânico da lama vermelha seca e calcinada a 600, 700, 800 e 900°C, bem como quanto a avaliação da liberação dos metais pesados em argamassas, cujo o cimento foi parcialmente substituído pela lama vermelha. O potencial pozolânico foi determinado através da análise do consumo de hidróxido de cálcio, utilizando-se análise térmica diferencial em pastas produzidas com hidróxido de cálcio e lama vermelha, e também empregando a metodologia da norma NBR 5752 (1992). A investigação dos compostos hidratados em pastas constituídas de lama vermelha e cimento foi realizada usando as técnicas de difração de raios-X e de análise térmica diferencial. A avaliação da liberação dos metais pesados das argamassas constituídas de lama vermelha, substituindo parcialmente o cimento, foi realizada usando os ensaios não destrutivos de lixiviação por difusão baseados na norma holandesa NEN 7345. Os resultados mostraram que a lama vermelha calcinada a 600°C apresenta a melhor atividade pozolânica. As análises por DRX e ATD mostraram a formação dos produtos de hidratação C-S-H, silicatos hidratados de alumínio e "hidrogarnets". As argamassas constituídas de lama vermelha calcinada a 600 e 800°C apresentaram as menores taxas de liberação dos metais pesados. Os resultados mostram que a lama vermelha poderá substituir parcialmente o cimento para produção de argamassas de baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: lama vermelha; pozolanas; argamassas.

1 INTRODUÇÃO

Para a produção do alumínio primário, metal este que é extensamente utilizado em diversas aplicações, são gerados resíduos, destacando-se a lama vermelha pela grande quantidade gerada e aos elevados custos com a sua disposição e gerenciamento ambiental. A lama vermelha é um resíduo oriundo do refino do bauxito durante o processo Bayer para a produção da alumina e posterior produção do alumínio, sendo geralmente depositada em forma de lagoas.

A quantidade de lama vermelha gerada varia muito em relação ao tipo de bauxito utilizado no processo, podendo variar de 0,3 a 2,5 toneladas para bauxitos de alta e baixa qualidade, para produção de aproximadamente 1 tonelada de alumina e 0,5 toneladas de alumínio (IAI, 2008; EUROPEAN ALUMINUM ASSOCIATION, 2008).

Em maio de 2009, o Brasil produziu 129,10 mil toneladas de alumínio (ABAL, 2009). Assim, estimando-se o Brasil gerou na condição mais favorável aproximadamente 77,40 mil toneladas de lama vermelha e, considerando a condição mais desfavorável 645,00 mil toneladas. A estimativa realizada apresenta um caráter meramente ilustrativo, entretanto, demonstra o tamanho do problema ambiental que a lama vermelha representa para o Brasil.

Pesquisas têm sido desenvolvidas para valorização da lama vermelha para produção de material cimentício. Singh et al. (1996), Tsakiridis e Leonardou (2004) e Vangelatos et al. (2009) avaliaram a qualidade de clínqueres produzidos com lama vermelha. Pera et al. (1997) utilizando a lama vermelha da França como material pozolânico produziram argamassas e concretos.

Estes últimos autores demonstraram que a lama vermelha da França apresenta atividade pozolânica quando calcinada em temperaturas entre 700 e 800°C. Ainda, uma melhor atividade pozolânica foi encontrada quando a lama vermelha é calcinada entre as temperaturas de 650 e 750°C, em função da composição química (AMBROISE, PERA, 2000).

No Brasil, Ribeiro e Morelli (2008) e Montini et al. (2009) observaram a influência da adição de lama vermelha seca no tempo de início e fim pega do cimento Portland através do aparelho de Vicat e, o índice de pozolanicidade do resíduo de acordo com a NBR 5752 (1992).

Nos estudos com lama vermelha brasileira existem lacunas nas preparações das amostras quanto a melhor temperatura de calcinação para o melhor índice de atividade pozolânica. Além disso, pesquisas com lama vermelha brasileira se restringem a uma pequena quantidade de ensaios físicos nas pastas ou argamassas, não se avaliando as reações químicas que ocorreram nas amostras.

Pode-se delinear que a composição química da lama vermelha varia de acordo com a origem do bauxito e que existe uma relação entre a temperatura de calcinação da lama vermelha e sua atividade pozolânica.

Este artigo avalia a propriedade pozolânica da lama vermelha brasileira seca e calcinada em diferentes temperaturas pelo procedimento do consumo de hidróxido de cálcio estabelecido por Ambroise et al. (1985), adaptado por Cherif et al. (1999), e em comparação com a norma brasileira NBR 5752 (1992). Além disso, o trabalho tem como um de seus enfoques analisar os compostos hidratados em pastas produzidas com lama vermelha brasileira em substituição ao cimento, utilizando-se os métodos de difração de raios-X e análise térmica diferencial.

A avaliação da resistência à compressão e propriedades higroscópicas das argamassas confeccionadas com lama vermelha também são apresentadas neste artigo. Por fim, o presente artigo procurou contribuir com a avaliação ambiental da lama vermelha brasileira por meio dos ensaios de lixiviação descritos na normalização brasileira e, a avaliação ambiental de argamassas produzidas com lama vermelha de acordo com a norma holandesa NEN 7345 (1995).

2 OBJETIVO

Avaliar as características potenciais da lama vermelha como material pozolânico para posterior produção de argamassas.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

A amostra de lama vermelha foi obtida em uma indústria produtora de alumina no estado de Minas Gerais, com um teor de umidade de 61,5%. Para a produção das pastas e argamassas utilizou-se a LV seca e calcinada a 600, 700, 800 e 900°C. Devido ao alto teor de umidade foi realizada a secagem da LV a $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Em seguida, realizou-se a calcinação da LV nas temperaturas de 600, 700, 800 e 900°C -1 hora. As amostras de LV seca e calcinadas foram moídas e peneiradas para obtenção de uma granulometria inferior a 0,15 mm.

Para a análise da atividade pozolânica (método do consumo de hidróxido de cálcio) foi utilizado hidróxido de cálcio (P.A.) e farinha de sílica inerte (granulometria <150 μm). Na determinação do índice de atividade pozolânica (NBR 5752,1992), utilizou-se o cimento Portland CPI-S. Para a confecção das pastas e argamassas utilizou-se o cimento CII-F-32. As argamassas foram confeccionadas com areia padrão, normalizada pelo IPT.

3.2 Caracterização da lama vermelha

Visando a obtenção das características físico-químicas da lama vermelha e sua constituição mineralógica, foram realizados os seguintes ensaios no material com dimensões inferiores a 150 μm : análise química (EDX), difração de raios-X (DRX), granulometria à laser e área específica (Blaine).

3.3 Avaliação da atividade pozolânica da lama vermelha

Para avaliar o potencial de pozolanicidade da lama vermelha utilizou-se o procedimento proposto por Ambroise et al. (1984) e adaptado por Cherif et al. (1999). A área do pico do hidróxido de cálcio residual do termograma de uma pasta constituída de 50% LV e 50% de hidróxido de cálcio foi comparada a área do pico do hidróxido de cálcio do termograma de uma pasta constituída de 50% de hidróxido de cálcio e 50% de sílica pura inerte (referência).

As pastas foram moldadas com relação água/sólido de 0,60. Para todas as amostras foi utilizado 2% de aditivo superplasticificante, exceto, na amostra de lama vermelha calcinada a 900°C, a qual necessitou de uma menor quantidade de aditivo superplasticificante (1%). Após os períodos de hidratação: 3, 7 e 28 dias, as amostras foram secas em estufa à temperatura de 50°C durante 24 h, moídas nas dimensões inferiores a 150 μm . Posteriormente, as amostras foram submetidas à análise térmica diferencial.

A avaliação da atividade pozolânica, também foi realizada conforme o critério de procedimento estabelecido pela NBR 5752 (1992).

3.4 Investigação dos compostos hidratados em pastas

A investigação dos compostos hidratados foi realizada em pastas compostas por 5 e 15% de lama vermelha seca e calcinada, em substituição em massa ao cimento CII-F-32. As pastas foram moldadas com relação água/aglomerante de 0,3 e aditivo superplasticificante. A investigação dos compostos hidratados das pastas foi realizada utilizando-se os ensaios de difração de raios-X e análise térmica diferencial. Após os períodos de hidratação (3, 7 e 28 dias), as amostras foram secas em estufa à temperatura de 50°C durante 24 h. Depois, as pastas foram moídas para as dimensões inferiores a 150 μm e, submetidas aos ensaios de difração de raios-X e análise térmica diferencial.

3.5 Produção de argamassas

As argamassas foram produzidas no traço 1:3, com relação água/cimento de 0,53, o suficiente para produzir argamassas com índices de consistência de 225 ± 5 mm. Nas argamassas com 10 e 15% de lama vermelha foi utilizado aditivo superplasticificante. O cimento CII-F-32 foi substituído por 5,10 e 15% de LV seca ou calcinada. Para os ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade foram produzidos corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões de 5 x 10 cm para cada composição de argamassa. As argamassas para o ensaio de tanque foram confeccionadas em moldes prismáticos nas dimensões de 4 x 4 x 16 cm.

3.6 Avaliação da resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão das argamassas foi realizado de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 13279 (1995). O ensaio foi executado aplicando-se uma carga de $0,25 \pm 0,05$

MPa/s até a ruptura do corpo-de-prova.

3.7 Absorção de água por capilaridade

Para a determinação da absorção de água por capilaridade das argamassas adotou-se o procedimento utilizado pelo grupo ValoRes. Este procedimento consiste na medida da variação da altura em função do tempo de uma coluna de água contida em um tubo de Mariotte graduado, sendo que esta variação de altura da coluna de água está diretamente relacionada com a quantidade de água absorvida pela amostra. Através deste experimento é possível realizar medidas consecutivas para cada unidade de volume ingressado na amostra, sendo que a menor leitura que pode ser obtida neste aparato é de um volume de aproximadamente de 0,5 cm³. Com a intenção de minimizar a evaporação de água através da superfície dos corpos-de-prova as faces laterais e superior foram envolvidas com filme de PVC. Através dos dados obtidos de volume de água absorvida foi determinado o volume de água absorvida por secção da amostra, denominado índice de absorção ($I = \text{cm}^3/\text{cm}^2$). Posteriormente, foi obtido o coeficiente de absorção da água ou sorptividade, o qual é a inclinação da reta: índice de absorção *versus* raiz do tempo.

3.8 Ângulo de molhamento aparente

A determinação do ângulo de molhamento está baseada em um procedimento experimental geralmente aplicado em solos. Este procedimento propõe a determinação do ângulo de molhamento aparente por meio da avaliação da ascensão capilar em ensaio realizado em argamassas considerando-se a cinética de absorção capilar de dois líquidos molhantes diferentes: água e álcool. O álcool é utilizado pelo fato deste ser considerado um líquido perfeitamente molhante, ou seja, o ângulo de molhamento é praticamente nulo, em razão do menisco capilar ser plano. Assim, a absorção capilar de álcool implica uma diferença de pressão praticamente nula que acarreta uma pequena força capilar (MEROUANI, 1987 apud SANTOS, 2006). Assim, determinou-se o ângulo de molhamento aparente por meio da eq.1:

$$\cos\alpha_e = \left(\frac{Se}{Sa} \right)^2 \frac{\mu_e \cdot \sigma_a}{\mu_a \cdot \sigma_e} \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

α_e = ângulo de molhamento aparente;

μ_e = viscosidade dinâmica da água;

μ_a = viscosidade dinâmica do álcool;

σ_e = tensão superficial água-ar;

σ_a = tensão superficial álcool-ar;

Se = inclinação da reta do gráfico que relaciona a absorção de água (St) com a raiz do tempo;

Sa = inclinação da reta do gráfico que relaciona a absorção de álcool (St) com a raiz do tempo.

O aparato do ensaio de absorção de água por capilaridade também foi utilizado para determinar o ângulo de molhamento aparente. A única alteração consistiu na substituição da água destilada e desionizada por álcool etílico. As amostras utilizadas foram as mesmas do ensaio com água, sendo estas previamente secas.

3.9 Avaliação ambiental

As amostras de lama vermelha seca e calcinada nas temperaturas de 600, 700, 800 e 900°C e, com granulometria inferior a 0,15 mm foram submetidas ao ensaio de lixiviação. Para a realização do ensaio foram adotados os procedimentos descritos na norma brasileira NBR 10005 (2004).

Para avaliar a liberação de metais pesados das argamassas foi executado o ensaio de lixiviação de acordo com o procedimento estabelecido pela norma holandesa NEN 7345 (1995). Os corpos-de-prova foram dispostos em tanques acrílicos e cobertos pelo lixiviante com uma relação líquido/sólido igual a 5 (Figura 1). Como lixiviante, utilizou-se água desmineralizada acidificada até atingir o valor de pH aproximadamente 4 (com HNO₃). Após 64 dias o extrato lixiviado obtido foi filtrado. A concentração de metais no extrato lixiviado foi analisada utilizando-se espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX).

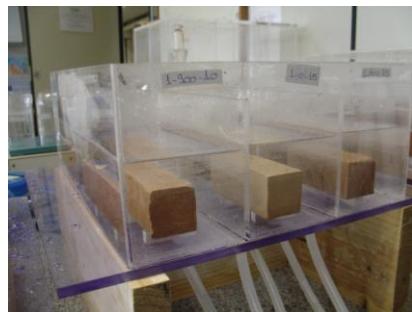


Figura 1 – Argamassas produzidas com lama vermelha no recipiente acrílico

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Caracterização da lama vermelha

A composição química da lama vermelha seca e calcinada é apresentada na Tabela 1. Os principais óxidos da lama vermelha seca ou calcinada são a alumina (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3), sílica (SiO_2) e sódio (Na_2O). Os três primeiros constituintes são resultantes da composição química da bauxita. Já, a presença de Na_2O nas amostras deve-se a adição de hidróxido de sódio durante a etapa da digestão do processo Bayer. Os elementos Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 representam 78% da constituição da lama vermelha seca e 66% da constituição da LV calcinada.

Tabela 1 – Composição química da lama vermelha seca e calcinada

Amostra	Óxidos (%)				
	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Na_2O	CaO
LV- Seca	32,220	23,977	21,904	9,321	3,697
LV- 600°C	28,948	19,528	18,362	9,014	3,058
LV- 700°C	28,639	19,033	18,496	9,469	3,016
LV- 800°C	28,651	18,882	18,693	9,708	2,955
LV- 900°C	29,645	18,924	18,248	8,912	3,028

A Figura 2 apresenta a análise mineralógica da lama vermelha seca a 105°C. As fases detectadas na lama vermelha seca foram a chantalita (1), cancrenita (2), gibbsita (3), hematita (4), quartzo (5) e calcita (6).

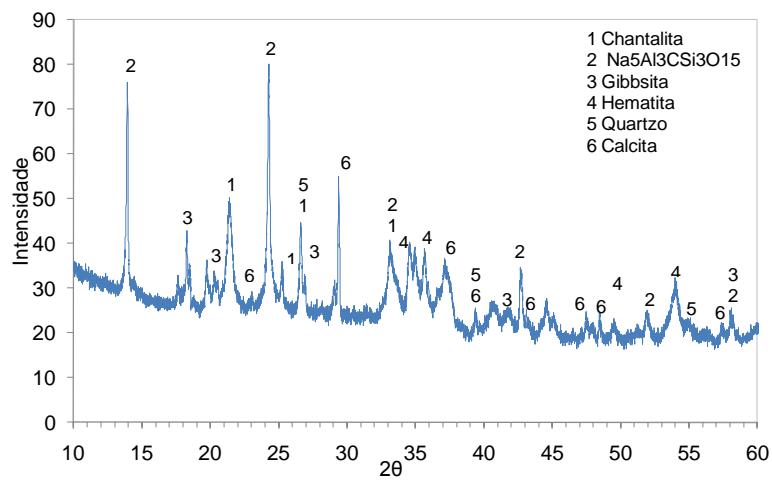


Figura 2 - Difratograma da lama vermelha seca a 105°C

Os resultados da composição granulométrica da lama vermelha seca a 105°C, obtidos pelo método de difração à laser mostraram que a LV é um material fino, com 100% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,018 mm, 50% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,0020 mm e 30% das suas partículas com diâmetro inferior a 0,001 mm. As amostras de lama vermelha seca e calcinada apresentaram valores de área específica em torno de 6 a 9 vezes superiores ao valor da área específica

do cimento CPII-F-32 (Tabela 2). Todas as amostras de LV calcinada, exceto a LV calcinada a 900°C, apresentaram área específica superior à área específica da LV seca. Esta menor área específica da LV calcinada a 900°C pode estar relacionada com a obtenção de uma estrutura cristalina nesta temperatura de calcinação.

Tabela 2 - Área específica da lama vermelha e do cimento CPII-F

	LV- Seca	LV- 600°C	LV- 700°C	LV- 800°C	LV- 900°C	CPII-F
Área esp. (cm ² /g)	25076	29052	27648	27121	20788	3200

4.2 Avaliação da atividade pozolânica da lama vermelha

4.2.1 Método do consumo de hidróxido de cálcio

Os termogramas das pastas com lama vermelha seca, calcinada a 600 e 900°C e pasta referência (3, 7 e 28 dias) são apresentados na Figura 3. Os resultados obtidos mostram a presença de pico endotérmico a 115 e 125°C, o qual indica a presença de silicato de cálcio hidratado (CSH) e possivelmente gel CAH. A fase Afm é evidenciada pelo pico endotérmico a 200°C. O pico em torno de 320°C é atribuído à desidroxilação da gibbsita - Al(OH)₃. O pico entre 500 e 550°C representa o Ca(OH)₂ residual. Nas pastas com LV calcinada a 700 e 800°C foram identificados os mesmos picos encontrados nas pastas com lama LV calcinada a 600°C, variando apenas o tamanho do pico.

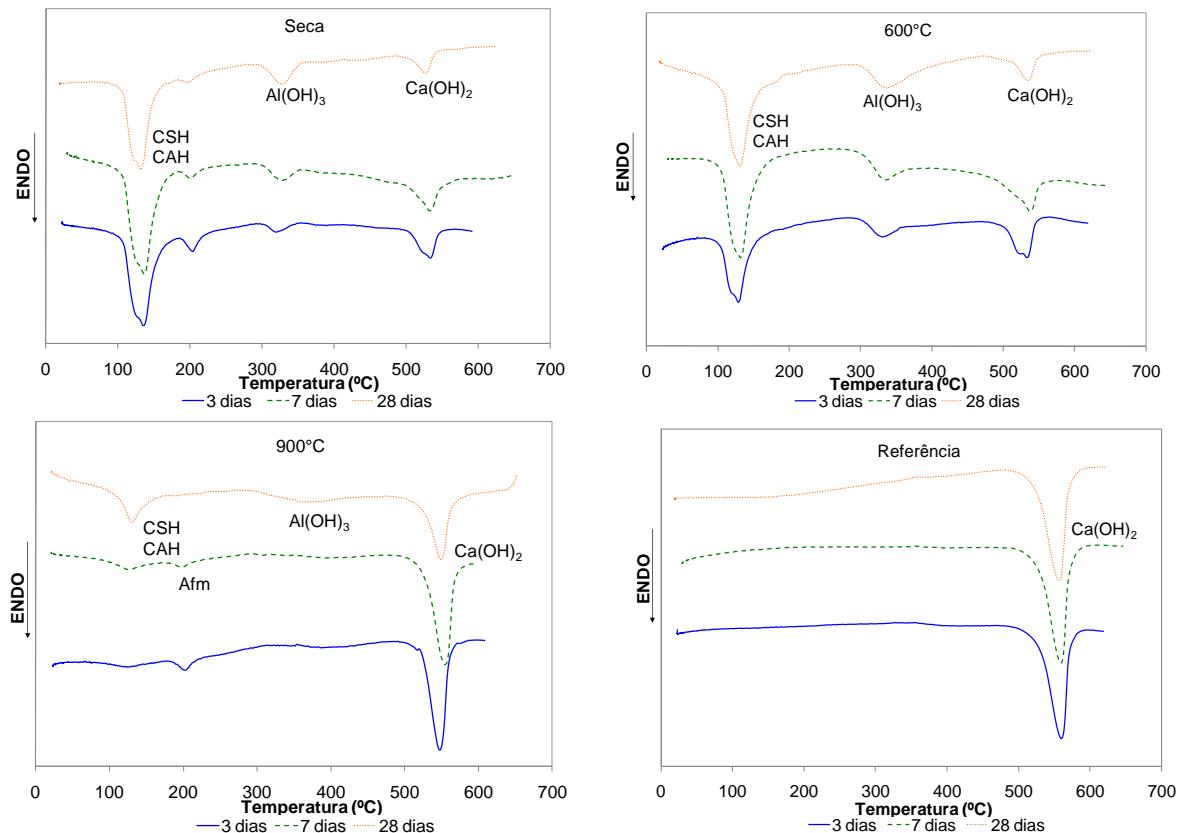


Figura 3 – Termogramas da pasta referência e das pastas com lama vermelha seca e calcinada

Para as pastas produzidas com lama vermelha seca e calcinada, quanto maior a idade, menor é a área do pico do Ca(OH)₂ e, consequentemente, maior é o consumo de hidróxido de cálcio. A redução da área do pico de hidróxido de cálcio ao longo do tempo e a presença de silicato de cálcio hidratado, da fase Afm e possivelmente gel CAH, indicam que a lama vermelha possui atividade pozolânica, pois a sílica e a alumina nela contida reagiram com o hidróxido de cálcio, formando estes compostos com

propriedades cimentantes.

Diferente das outras amostras, a pasta com lama vermelha calcinada a 900°C não apresentou gibbsita atribuído à sua desidroxilação completa e irreversível transformando-se na formas de alumina alfa ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$). Além disso, nos termogramas das pastas com lama vermelha calcinada a 900°C os picos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ são maiores quando comparados com os picos das outras pastas produzidas com lama vermelha, indicando um menor potencial pozolânico.

Aos 28 dias, as pastas contendo lama vermelha seca e calcinada a 600, 700 e 800°C apresentam um consumo de hidróxido de cálcio superior a 80%, sendo que o máximo de 92% foi atingido pela pasta contendo a lama calcinada a 600°C. A pasta contendo a LV calcinada a 900°C apresentou o menor consumo de hidróxido de cálcio aos 28 dias (67%); isso pode ser devido cristalização completa da lama nesta temperatura.

4.2.2 Índice de atividade pozolânica – NBR 5752

A normalização brasileira avalia a pozolanicidade do material, que, além de apresentar um teor de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$, deve possuir um índice de atividade pozolânica superior ou igual a 75%. Os resultados mostraram que apenas a lama vermelha seca apresenta percentual de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$. Apesar destes resultados, optou-se pela realização do ensaio de resistência à compressão com o intuito de verificar o índice de atividade pozolânica das amostras e comparar com os resultados obtidos pelo método do consumo de hidróxido de cálcio.

Os resultados dos índices de atividade pozolânica demonstram que as amostras de lama vermelha seca ou calcinada nas temperaturas de 600, 700, 800 e 900°C não apresentam o índice de atividade pozolânica mínimo de 75% quando avaliadas pela metodologia da NBR 5752 (1992), conforme apresentado na Figura 4.

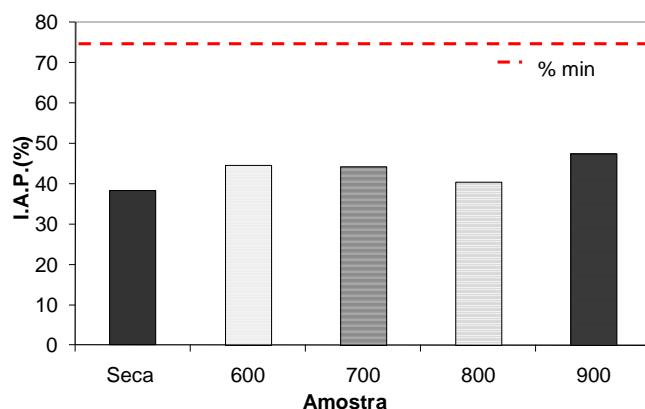


Figura 4 - Índice de atividade pozolânica da lama vermelha com cimento aos 28 dias

Todavia, os resultados de avaliação de atividade pozolânica pelo método do consumo de hidróxido de cálcio comprovam que há uma atividade pozolânica para as amostras de lama vermelha seca e calcinadas a 600, 700 e 800°C. Também, mostram que no caso da LV calcinada a 900°C, esta parece agir mais como fíler do que como pozolana colaborando para os melhores resultados obtidos pela norma NBR 5752 (1992).

Convém destacar que a avaliação da atividade pozolânica da lama vermelha pelo método de resistência à compressão (NBR 5752:1992) não é o mais adequado, pois ele caracteriza erroneamente a LV calcinada a 900°C como material com maior índice de atividade pozolânica, sendo que o mesmo possui o menor consumo de hidróxido de cálcio e formação de C-S-H.

4.3 Investigação dos compostos hidratados

O ensaio de difração de raios-X foi realizado nas pastas de referência e nas pastas com 15% de lama vermelha calcinada a 600 e 900°C, as quais, obtiveram, respectivamente, o maior e o menor consumo de hidróxido de cálcio, nas idades de 3,7 e 28 dias. As Figuras 5 e 6 apresentam os difratogramas das pastas de referência e das pastas com 15% de LV calcinada a 600°C.

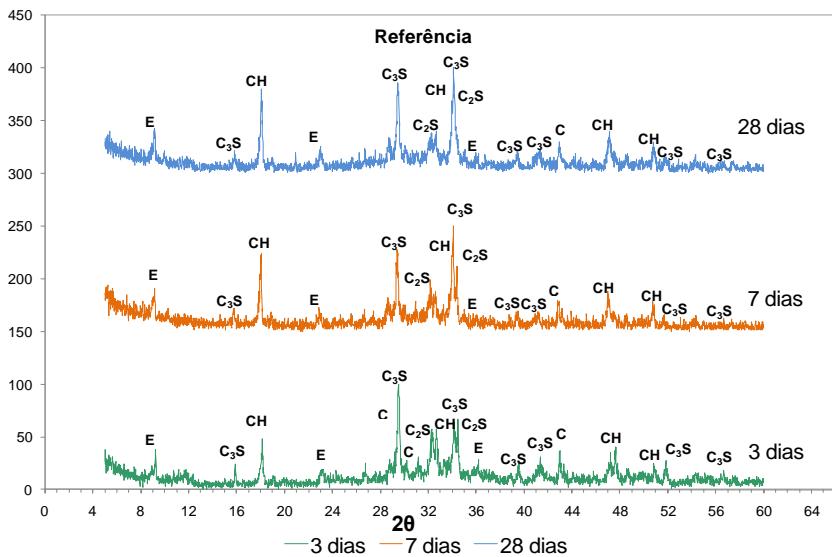


Figura 5 - Difratogramas das pastas de referência

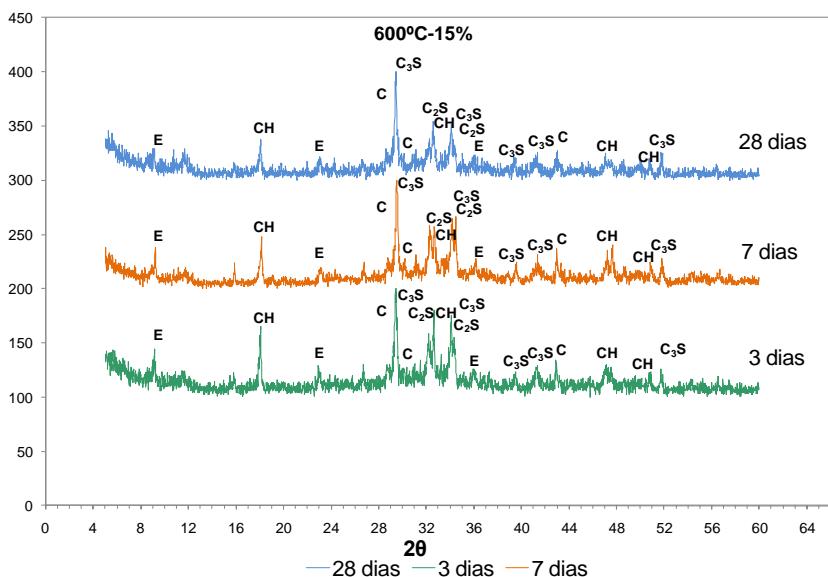


Figura 6 - Difratogramas das pastas com 15% de lama calcinada a 600°C

As pastas produzidas com lama vermelha calcinada a 600 e 900°C e as pastas de referência apresentaram os mesmos produtos de hidratação: a etringitta (E) e a portlandita (CH). Isso mostra que a incorporação da LV nas misturas não modificou os tipos de compostos normalmente hidratados em uma pasta de cimento. A presença de calcita (C) nas pastas provém do tipo de cimento utilizado (CPII-F-32), o qual é composto por 6 a 10% de fíber calcário.

A Figura 7 apresenta os termogramas das pastas com 5% e 15% de lama vermelha e da pasta de referência respectivamente. As análises térmicas diferenciais nas pastas com 5 e 15% de LV mostraram a formação do silicato de cálcio hidratado (CSH) e, a existência de um novo composto hidratado, a fase Afm e também, possivelmente gel CAH, que de fato não existem nas pastas de referência (somente cimento), estes últimos resultantes das reações pozolânicas dos compostos aluminosos da LV com os compostos do cimento. A presença da fase Afm e gel CAH nas pastas é justificada pela maior quantidade de LV adicionada e, consequentemente, um maior teor F_2O_3 e Al_2O_3 para a formação da fase Afm e gel CAH.

A presença do pico pequeno a 300°C, nas pastas produzidas com lama vermelha seca e calcinada a

600, 700 e 800°C é correspondente a presença residual da gibbsita. O pico entre 500 e 600°C é associado à portlandita (CH).

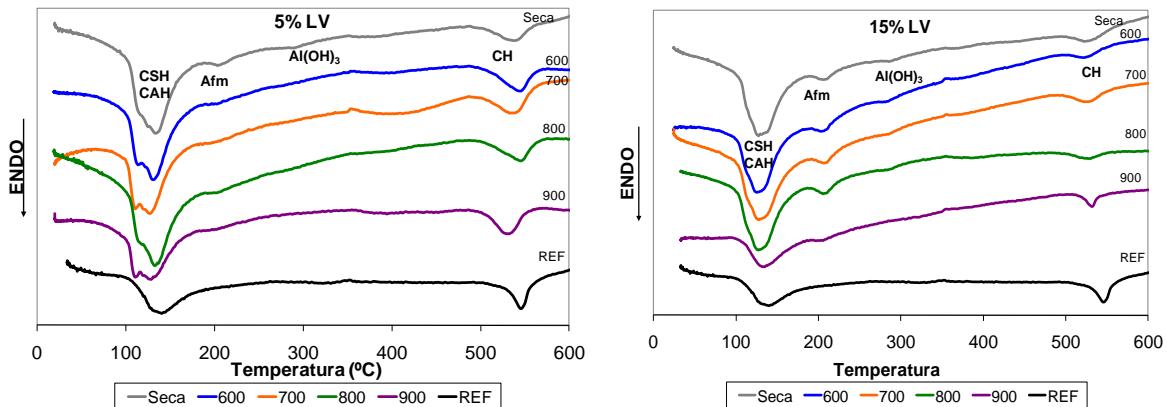


Figura 7 - Termogramas das pastas produzidas com 5 e 15% de lama vermelha e da pasta referência

4.4 Avaliação da resistência à compressão

As argamassas confeccionadas com 5% de lama vermelha seca e calcinada a 600, 700 e 800°C apresentaram valores de resistência à compressão aos 28 dias em média iguais aos valores de resistência à compressão da argamassa referência (Figura 8). As argamassas com 5% de LV calcinada a 900°C apresentaram maiores valores de resistência à compressão se comparadas com as demais amostras. Apesar do menor efeito pozolânico da LV calcinada nesta temperatura, um maior efeito fíller parece ter melhorado a resistência à compressão destas amostras.

As argamassas produzidas com substituições de cimento por 10 e 15% de lama vermelha seca ou calcinada a 600, 700 e 800°C apresentaram resistência inferior à amostra de referência. Somente a LV calcinada a 900°C pode substituir até 15% da massa do cimento aumentando a resistência das argamassas. Apesar das argamassas produzidas com 10 e 15% de LV seca e calcinadas a 600, 700 e 800°C apresentarem resistências à compressão inferiores a resistência da argamassa de referência, estas argamassas podem ser utilizadas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, onde não são necessárias elevadas resistências à compressão para sua utilização.

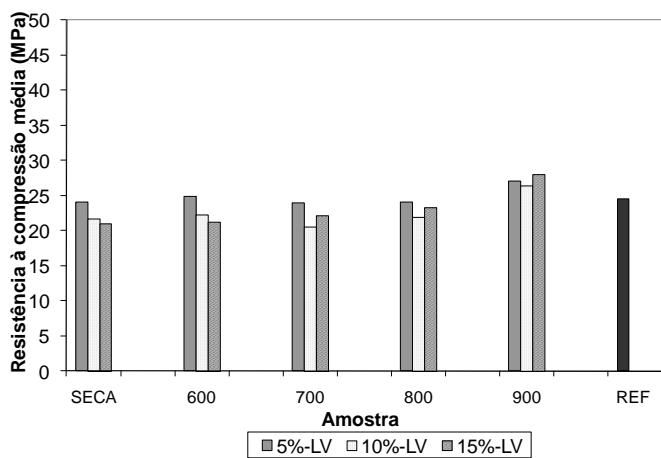


Figura 8 – Resistência à compressão média das argamassas

4.5 Absorção de água por capilaridade e ângulo de molhamento

As substituições de cimento por 5% de lama vermelha seca ou calcinada diminuíram a sorptividade das argamassas, isto quando comparadas com a argamassa de referência (Figura 9 (a)). As menores sorptividades nas argamassas com 5% de LV parecem estar relacionadas com a propriedade pozolânica e um possível efeito fíller da LV, onde os cristais grandes e orientados de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ são substituídos por inúmeros cristais menores e menos orientados, reduzindo a conectividade dos poros e

diminuído a quantidade de água absorvida.

As argamassas contendo 10% de lama vermelha (Figura 9 (b)) apresentaram uma maior sorptividade quando comparadas com as argamassas produzidas com 5% de LV. Nas substituições de cimento por 10% de LV, somente as argamassas produzidas com LV calcinada a 700, 800 e 900°C apresentaram sorptividade inferior a sorptividade da argamassa de referência. Das amostras analisadas, destaca-se a argamassa com LV calcinada a 900°C, pois sua menor área específica parece ter promovido um maior efeito filer, ocasionando um refinamento dos poros e melhorando a propriedade de capilaridade das argamassas.

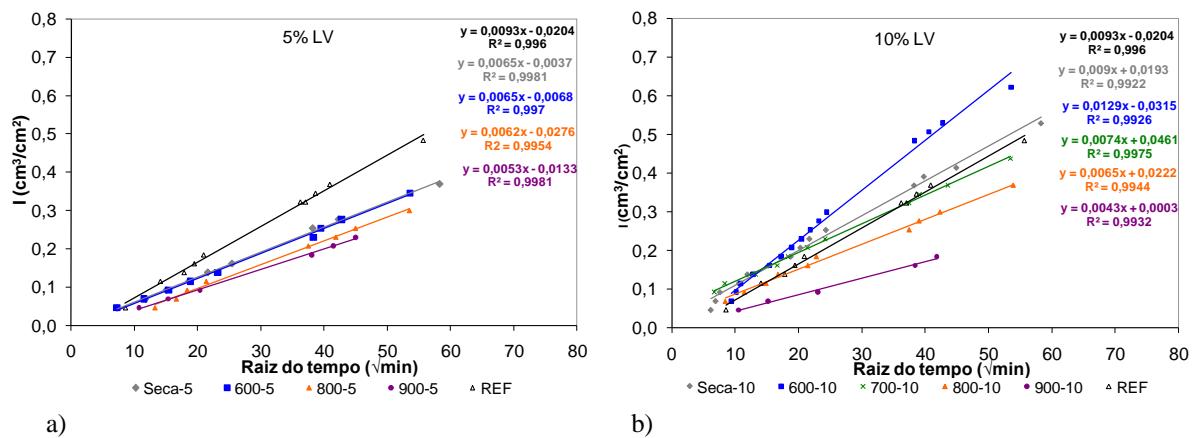


Figura 9 - Volume de água pela secção da amostra x raiz do tempo: a) argamassas com 5% de LV e referência
b) argamassa com 10% de LV e referência

As argamassas com 5% de lama vermelha apresentaram ângulo de molhamento aparente maior do que a argamassa sem LV (Figura 10), logo apresentaram menor molhabilidade. Os maiores ângulos de molhamento nas argamassas produzidas com 5% de LV eram esperados, visto que estas argamassas apresentaram menor sorptividade quando comparadas com a amostra referência. Quanto maior o teor de LV na mistura, menor o ângulo de molhamento aparente, ou seja, maior a molhabilidade, exceto para a amostra com LV calcinada a 900°C. Quanto maior o teor de LV calcinada a 900°C maior é o ângulo de molhamento e menor a molhabilidade. Esta redução da molhabilidade pode estar relacionada com a propriedade pozolânica e maior efeito filer da LV quando calcinada a 900°C.

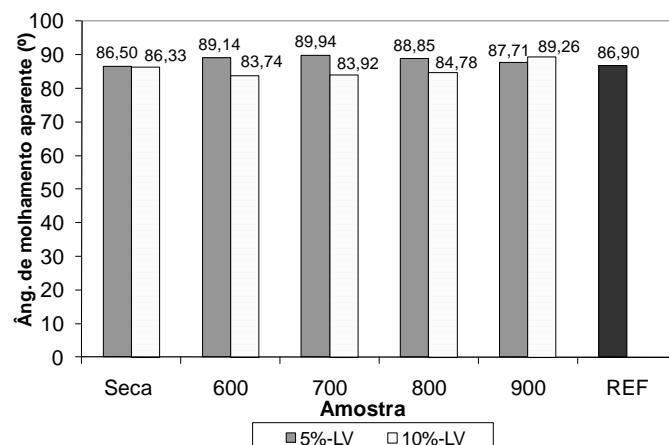


Figura 10 – Ângulo de molhamento aparente das argamassas

4.6 Avaliação ambiental

As concentrações dos metais lixiviados da lama vermelha seca e calcinada e, do cimento CII-F são apresentadas na Figura 11. Os resultados mostram que a LV, seja calcinada ou seca, é classificada como resíduo perigoso (classe I), pois em todos os casos apresentaram concentrações de cromo e selênio superiores aos valores limites definidos pelo anexo F da NBR 10004 (2004).

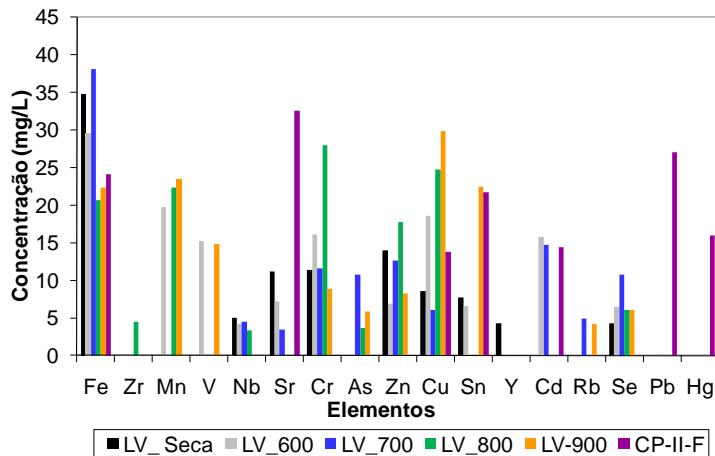


Figura 11 – Concentrações dos elementos lixiviados das amostras de LV do cimento CPII-F

Os elementos lixiviados das argamassas com 5 e 10% de lama vermelha e da argamassa de referência são apresentados na Figura 12. As argamassas produzidas sem adição de LV apresentaram concentrações de cádmio e mercúrio superiores aos valores limites descritos no anexo F da NBR 10004 (2004). Os resultados mostram que argamassas com 5 e 10% de LV liberam mais metais pesados que argamassas sem adição de LV. Entretanto, as argamassas com 5 e 10% de LV apresentaram concentrações lixiviadas de cádmio e mercúrio menores que as concentrações lixiviadas da argamassa de referência. Para as argamassas com 5% de LV, as menores concentrações de metais pesados lixiviados ocorreram, de forma geral, nas argamassas produzidas com lama vermelha calcinada a 800, 600 e 900°C.

As argamassas produzidas com 10% de lama vermelha calcinada a 700, 800 e 900°C apresentaram uma maior concentração de metais pesados lixiviados quando comparadas com as argamassas produzidas com 5% de lama vermelha. Para as argamassas com 10% de LV, as menores concentrações de metais pesados lixiviados ocorreram, de forma geral, nas argamassas produzidas com LV calcinada a 600°C.

Todas as amostras produzidas com 5 e 10% de lama vermelha apresentaram concentrações lixiviadas de cromo superiores aos valores limites estabelecidos pela NBR 10004 (2004). Não houve lixiviação detectável de vanádio nas argamassas produzidas com 5 e 10% de lama vermelha calcinada a 600 e 900°C, mostrando que este elemento proveniente da composição química da lama vermelha se encontra em compostos químicos estáveis.

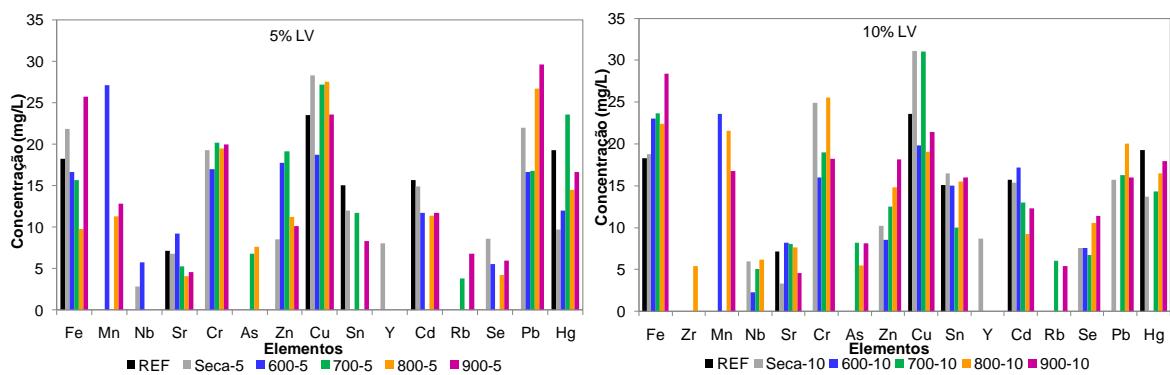


Figura 12 – Concentrações dos elementos lixiviados das argamassas com 5% e 10% de LV

5 CONCLUSÕES

As análises realizadas na lama vermelha seca e calcinada demonstraram que elas possuem em sua composição química sílica e alumina, compostos estes que conferem a propriedade pozolânica à LV.

As lamas vermelhas secas e calcinadas a 600, 700, 800 e 900°C apresentam potencial em desenvolver atividade pozolânica na presença de hidróxido de cálcio. Embora a avaliação da atividade pozolânica da LV pelo procedimento da norma NBR 5752 (1992) tenha classificando a LV como material não pozolânico, no estudo do consumo do hidróxido de cálcio com a análise térmica diferencial, as

amostras de LV seca e calcinada a 600, 700 e 800°C apresentaram um elevado consumo de hidróxido de cálcio, sendo o maior consumo medido a 600°C. Além disso, houve a formação dos produtos de hidratação, silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), fase Afm e possivelmente gel CAH, mostrando assim uma certa atividade pozolânica. A lama vermelha calcinada a 900°C apresenta o menor consumo de hidróxido de cálcio, porém, apresenta a maior resistência à compressão, e mostrando assim um maior efeito fíler.

Os resultados de resistência à compressão, sorptividade e liberação de metais pesados das argamassas, mostram que a substituição mais indicada é de lama vermelha calcinada a 600°C.

6 REFERÊNCIAS

- ABAL, Associação Brasileira do Alumínio.** Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso: maio 2009.
- AMBROISE, J.; PERA, J. Red mud, an interesting secondary raw material. In: CONSTRUCTION & ENVIRONMENT, 2000, São Paulo.
- AMBROISE, P.; MURAL, M.; PERA, J. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. IV: Experimental condition fro strength improvement of metakaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 15, pp. 83-88, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5752 - **Materiais pozolânicos** – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de adividade pozolânica com o cimento. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. NBR 13279 – **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos –** Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. NBR 10004 – **Resíduos Sólidos** – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 10005 – **Lixiviação de resíduos** – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado. Rio de Janeiro, 2004.
- CHERIAF, M.; ROCHA, J.C.; PERA, J. Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, pp. 1387-1391, 1999.
- EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION.** Disponível em: <<http://www.eaa.net/>>. Acesso em: maio 2008.
- IAI, International Aluminium Institute.** Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/>> . Acesso em: maio 2008.
- MONTINI, M.; GALLO, J.B; MARTINS, L.T; MAIA, E.L; YAMAMOTO, C.F.; LOURENÇO, R.R; RODRIGUES, J. A.. **Aplicações do resíduo de bauxita e da cinza pesada da indústria do alumínio na fabricação de cimento Portland.** In: Congresso Brasileiro de Cerâmica ,53, 2009, Guarujá, SP.
- NNI, **NEN 7345**, Determination of Leaching From Monolithic Construction Materials and Waste Materials by Means of a Diffusion Test, NNI, Amsterdam, 1995.
- PERA, J.; BOUMAZA, R.; AMBROISE, J. . Development of a pozzolanic pigment from red mud. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n.10, pp. 1513-1522, 1997.
- RIBEIRO, D.V; MORELLI, M.R.. **Estudo da viabilidade da utilização do resíduo de bauxita como adição ao cimento Portland.** In: In: CBECiMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 18, 2008, Pernambuco.
- SANTOS, Flora.I. G.**Avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC. 2006.
- SINGH, M; UPADHAYAY, S. N; PRASAD, P. M. Preparation of special cements from red mud. **Waste Management**, v.16, n. 8, pp. 665-670, 1996.
- TSAKIRIDIS P.E; LEONARDOU, S. A.. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. **Journal of Hazardous Materials**, v. 116, pp. 103-110, 2004.
- VANGELATOS, I.; ANGELOPOULOS, G.N.; BOUFOUNOS, D. Utilization of ferroalumina as raw material in the production of Ordinary Portland Cement. **Journal of Hazardous Materials**, v.168, pp. 473 - 478, 2009.