

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E  
TECNOLOGIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS  
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAS**

**JORGE LUÍZ LAUREANO**

**REDUÇÃO DA ALCALINIDADE DISPONÍVEL DA LAMA  
VERMELHA MEDIANTE COMPOSIÇÃO COM ARGILAS  
PARA USO COMO ADITIVO SUPLEMENTAR AO CIMENTO  
PORTLAND**

**CRICIÚMA  
2014**

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E  
TECNOLOGIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS  
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAS**

**JORGE LUÍZ LAUREANO**

**REDUÇÃO DA ALCALINIDADE DISPONÍVEL DA LAMA  
VERMELHA MEDIANTE COMPOSIÇÃO COM ARGILAS  
PARA USO COMO ADITIVO SUPLEMENTAR AO CIMENTO  
PORTLAND**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Agenor De Noni Jr

**CRICIÚMA  
2014**

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

L378r Laureano, Jorge Luiz.

Redução da alcalinidade disponível da lama vermelha mediante composição com argilas para uso como aditivo suplementar ao cimento portland / Jorge Luíz Laureano ; orientador: Agenor de Noni Junior. – Criciúma, SC : Ed. do Autor, 2014.

85 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2014.

1. Lama vermelha. 2. Cimento portland. 3. Pozolanas.  
4. Argamassa. 5. Resíduos industriais – Reaproveitamento.  
I. Título.

CDD. 22. ed. 666.94

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

**JORGE LUÍZ LAUREANO**

**REDUÇÃO DA ALCALINIDADE DISPONÍVEL DA LAMA  
VERMELHA MEDIANTE COMPOSIÇÃO COM ARGILAS  
PARA USO COMO ADITIVO SUPLEMENTAR AO CIMENTO  
PORTLAND**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais no Programa de Pós - Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, dezembro de 2014

**BANCA EXAMINADORA**

---

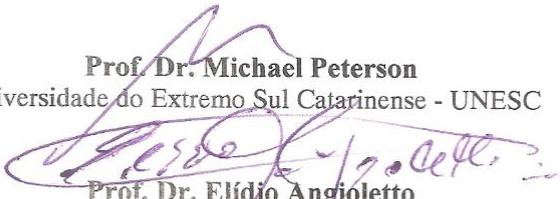
Prof. Dr. Luciano da Silva Coordenador do PPGCEM

---

Prof. Dr. Agenor De Noni Junior (UNESC) – Orientador

**Comissão Examinadora:**

**Prof. Dr. Michael Peterson**  
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

  
**Prof. Dr. Elídio Angioletto**  
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

  
**Prof.ª Dr.ª Janaina Accordi Junkes**  
Centro Universitário Tiradentes - UNIT

## AGRADECIMENTOS

A DEUS por me iluminar em todos os momentos difíceis da minha vida.

Em especial ao meu orientador ao Professor Dr. AGENOR DE NONI JR pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa, ensinamentos transmitidos e auxílio com os ensaios.

Aos meus professores: Dr. Michael Perterson, Dr. Elídio Angioletto, Dr. Fabiano Raupp Pereira, Dr. Luciano da Silva, Dr. Marcio Roberto da Rocha, Dr. Marcio Fiori, Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo, Dr. Adriano Michael Bernardini pela atenção, orientação, incentivo e experiências trocadas para a realização deste trabalho.

À minha esposa Maria e filhos, pelo total apoio e incentivo em todos os momentos difíceis, transmitindo otimismo.

Aos meus pais por sempre me incentivarem a estudar.

A toda minha família pelo incentivo e carinho.

Ao bolsista Eduardo Hobold Kammer pelo apoio e colaboração em todas as etapas deste trabalho e aos demais bolsistas e funcionários do Iparque que colaboraram direta ou indiretamente.

Aos colegas de laboratório do Iparque-UNESC: Augusto Wanderlid, Camila Machado de Oliveira, Jeanini Jiusti, Tchesare Andreas Keller, Carolina Milcharek Machado, Leticia Ferreira, Juarez, Karine Vefago, Flavia Minato.

A todos que de qualquer maneira contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.



*“Tudo vale a pena quando a alma  
não é pequena.”  
(Fernando Pessoa).*



## RESUMO

A lama vermelha (LV), resíduo da indústria de beneficiamento do alumínio, é gerada a partir do refino da bauxita para produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) através do processo Bayer. A geração mundial é de aproximadamente 100 milhões de toneladas por ano. O Brasil contribui com aproximadamente 10% deste montante. Apesar de a literatura indicar alguns possíveis usos, o material continua sendo depositado em aterros sem nenhuma finalidade industrial. O uso como material pozolânico tem sido apontado como uma importante forma de aproveitamento deste material. Entretanto a alcalinidade disponível limita sua aplicação de modo mais generalizado. O objetivo deste trabalho foi reduzir o teor de alcalinidade disponível na lama vermelha calcinada em composição com argila para viabilizar tecnicamente o uso como material suplementar em cimento Portland para aplicações estruturais. Uma amostra de lama vermelha foi obtida da empresa Alunorte S.A., maior refinaria de alumina do mundo, localizada no estado do Pará. A amostra de argila utilizada é oriunda da escavação da bacia de contenção da própria lama vermelha. Empregou-se cimento Portland tipo CPV - ARI. Os materiais foram caracterizados através dos ensaios de distribuição de tamanho de partículas, determinação da análise química por espectrometria de fluorescência de raios X e difração de raios X. A lama vermelha e a argila foram dosadas, homogeneizadas e pelotizadas em disco pelotizador de 60 mm. Preparou-se 3 misturas 100% LV, 85%-15% LV-AD, 70%-30% LV-AD. Calcinou-se em forno rotativo contínuo a 1200 °C por 78 min. O material calcinado foi moído em moinho planetário em dois diferentes tempos de moagem. Caracterizou-se a atividade pozolânica de acordo com a NBR 5272 (1992) e a alcalinidade disponível pelo método previsto na norma NM 25: 2002. Os resultados obtidos permitem concluir que foi possível reduzir o teor de álcalis disponíveis abaixo dos limites estabelecidos por norma, atingindo valores de 1,2%, sendo, portanto <1,5%. O índice de atividade pozolânica é de 90%, estando acima dos 75% estabelecidos por norma.

**Palavras-chave:** Lama vermelha. Valorização de resíduos. Pozolana. Argamassa.



## ABSTRACT

Red mud (RM), a residue of aluminum in the processing industry is generated from the refining of bauxite to produce alumina ( $Al_2O_3$ ) via the Bayer process. The global generation is approximately 100 million tons per year. Brazil contributes approximately 10% of this amount. Although the literature indicates some possible uses, the material remains deposited in landfills without any industrial purpose. Use as pozzolanic material has been touted as an important way to benefit from this material. However the available alkalinity limits its application more generally. The objective of this work was to reduce the level of alkalinity available in red mud calcined clay in composition to technically enable use as supplementary material in Portland cement in structural applications. A sample of red mud was obtained from the company ALUNORTE SA, the largest alumina refinery in the world, located in the state of Pará. A sample of clay, derived from the excavation of the basic content of red mud itself was also obtained. Was used Portland cement concrete CPV- ARI. The materials were characterized by testing for particle size distribution, determining spectrometry chemical analysis by x-ray fluorescence X-ray diffraction. The red mud and clay were pelleted and homogenized and dosed in a hard pelletador with 60 mm. Were prepared three mixtures LV 100%, 85% -15% LV-AD, 70% -30% LV-AD. It was calcined in a continuous rotary kiln at  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  for 78 min. The calcined material was ground mill in planetary I in two different milling times. Characterized the pozzolanic activity according to NBR 5272 (1992) and the alkalinity available for the method provided in the standard NM 25, 2002. The results support the conclusion that it was possible to reduce the alkali content available below the limits established by norm, reaching values of 1.2%, therefore  $<1.5$ . The pozzolanic activity index of 90% and above 75% as established by norm.

**Keywords:** Red mud. Waste recovery. Pozzolana. Mortar.



## **LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

**ABAL** - Associação Brasileira do Alumínio  
**ABCP**- Associação Brasileira de Cimento Portland  
**ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
**AD** - Argila de Descarte  
**Adi** - Alcalinidade Disponível  
**ALCOA** - Alcoa Alumínio S.A  
**ALUNORTE** - Alumina do Norte do Brasil S.A  
**ASC** - Aditivo Suplementar para Cimento  
**ASTM** - American Standard Test Method  
**ATD** – Análise Térmica Diferencial  
**CA** - Caulim  
**CBA** - Companhia Brasileira do Alumínio  
**C-S-H** – Silicato de cálcio hidratado  
**BA** - Bauxita  
**DNPM** - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral  
**DRX** - Difração de Raios X  
**FRX** - Fluorescência de Raios X  
**LV** - lama vermelha  
**MEV**- Microscópio Eletrônico de Varredura  
**NBR** - Norma Brasileira de Referência  
**RB** - Resíduo de Bauxita  
**WAO** – World Aluminium Organization (Organização Mundial de Alumínio)



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bauxita, Rocha sedimentar.....	26
Figura 2 - Bauxita moída e Alumina em pasta.....	26
Figura 3 - Fluxograma e Esquema do Processo Bayer.....	28
Figura 4 - Curvas de distribuição dos tamanhos de partículas (LV).....	32
Figura 5 - Distribuição do tamanho de partículas da LV in natura e após calcinação a 450°C, 650°C e 1000°C.....	37
Figura 6 - Pozolanicidade das Misturas.....	39
Figura 7 - Exemplo da caulinita.....	45
Figura 8 - Valores previstos e valores observados para a alcalinidade disponível e índice de atividade pozolânica.....	47
Figura 9 - Fluxograma do Experimento.....	48
Figura 10 - Pelotização das misturas.....	51
Figura 11 - Forno de Calcinação das misturas.....	52
Figura 12 - Corpos de prova.....	54
Figura 13 - Difratoograma do Cimento CP-V ARI.....	56
Figura 14 - Difratoograma da Lama Vermelha.....	57
Figura 15 - Difratoograma da Lama Vermelha Calcinada.....	58
Figura 16 - Difratoograma da Argila (AD).....	59
Figura 17 - Difratoograma da Lama Vermelha Calcinada 70% LV 30% AD Calcinada.....	60
Figura 18 - Difratoograma da Lama Vermelha Calcinada 85%LV 15%AD Calcinada.....	61
Figura 19 - Comportamento Térmico da Argila de Descarte-(DSC)....	62
Figura 20 - Comportamento Térmico da LV - (DSC).....	63
Figura 21 - Comportamento térmico da argila de descarte- Dilatométria.....	64
Figura 22 - Imagens amostra – MEV.....	68
Figura 23 - Nata homogênea.....	69
Figura 24 - Pasta de cimento bem homogênea envolvendo todos os grãos.....	69
Figura 25 - D.....	70
Figura 26 - E.....	70
Figura 27 - F.....	71
Figura 28 - G.....	71
Figura 29 - H.....	72
Figura 30 - I.....	72
Figura 31 - J.....	73



## LISTA TABELAS

Tabela 1 - Distribuição da Produção de Alumina e Localização por Empresa em 2008. (Unidade: 1000 Ton). .....	25
Tabela 2 - Faixa de variação da composição química da lama vermelha. ....	30
Tabela 3 - Composição química da LV por diferentes fontes (%). .....	31
Tabela 4- Estudos de valorização da lama vermelha. ....	33
Tabela 5 - Composição química da lama vermelha (%) gerada em diversos países. ....	34
Tabela 6 - Composições das diferentes misturas calcinadas à 1250 °C (2 horas). ....	35
Tabela 7 - Composição dos clínquers. ....	35
Tabela 8 - Efeito da temperatura de calcinação nas principais propriedades físicas da lama vermelha. ....	36
Tabela 9 - Composição química da lama vermelha calcinada a diferentes temperaturas obtida por fluorescência de raios X (FRX). .....	38
Tabela 10 - Exigências Químicas e Físicas da NBR 12653/1992. ....	43
Tabela 11 - Valores de ajustes V e p de significância das constantes e valor F de significância F do modelo. ....	46
Tabela 12 - Misturas x Tempo. ....	52
Tabela 13 - Composições químicas das matérias primas. ....	55
Tabela 14 - Granulometria das misturas. ....	65
Tabela 15 - Granulometria das misturas. ....	66
Tabela 16 - Resultados de Alcalinidade Disponível para os Materiais Estudados. ....	67
Tabela 17 - Composição elementar mássica, semi-quantitativa obtida por sonda EDS na região da nata do cimento dos traços estudos. ....	74



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
2.1 BAUXITA.....	24
2.2 ALUMINA.....	25
2.3 PROCESSO BAYER.....	26
2.4 LAMA VERMELHA (LV).....	30
2.5 APLICAÇÃO DA LAMA VERMELHA NO CIMENTO PORTLAND .....	33
2.6 CIMENTO PORTLAND .....	40
2.7 POZOLANAS .....	43
2.8 ARGILA .....	44
<b>2.8.1 Efeito de adição de Argila sobre a LV Calcinada. ....</b>	<b>46</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
3.1 MATÉRIAS-PRIMAS .....	49
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS .....	49
3.3 PREPARAÇÃO DO ADITIVO SUPLEMENTAR .....	50
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS .....	53
<b>3.4.1 Alcalinidade Disponível .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.2 Índice de Atividade Pozolânica .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.3 Caracterização Micro-estrutural.....</b>	<b>54</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>55</b>
4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	55
4.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	56
4.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO .....	61
4.4 DILATOMETRIA ÓPTICA .....	63
4.5 DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DE PARTICULAS.....	64
4.6 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA .....	65
4.7 ALCALINIDADE.....	66
4.8 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	67
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>75</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	76
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>





## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre. A produção mundial na forma metálica, atualmente, supera a soma de todos os outros metais não ferrosos (FIGUEIREDO, 2000). O alumínio é facilmente encontrado em diversos produtos do nosso dia-a-dia, conquistando destaque cada vez maior dentro das mais variadas aplicações, tais como: estruturas, esquadrias, telhas, aviões, barcos, automóveis, vagões na indústria eletro-eletrônica, embalagens, máquinas e equipamentos, entre outros (HIND et al., 1999).

O alumínio possui excelentes propriedades físicas e químicas, entre as quais se ressaltam o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a alta condutividade térmica e elétrica (IAI, 2008). É produzido a partir da alumina usando o processo Heroult-Hall. A Alumina ( $Al_2O_3$ ), por sua vez é extraída da bauxita pelo Processo Bayer. Para cada 5 toneladas de bauxita são obtidas em geral 2 toneladas de alumina, gerando 1 tonelada de alumínio (MARTINES, 2009).

O Brasil possui a terceira maior reserva de bauxita do mundo, perdendo apenas para Guiné e Austrália. Suas reservas somam 3,4 bilhões de toneladas (10% das reservas mundiais) e sua produção anual é de 26 milhões de toneladas/ano (MARTINES, 2009).

A lama vermelha (LV) é o principal resíduo sólido gerado na cadeia produtiva do alumínio primário. É um material resultante do refino da bauxita no processo Bayer. Sua disposição e gerenciamento ambiental condicionam às empresas a elevados custos (RIBEIRO, 2008). A metodologia mais amplamente praticada corresponde ao depósito em lagoas (WANG et al., 2008). Esta bacia deve ter sua base impermeabilizada devido a elevada alcalinidade deste resíduo (KURDOWSKI, 1997, SILVA FILHO et al., 2007).

As empresas geradoras de LV se preocupam também com outros resíduos como a argila oriunda da escavação do depósito e as cinzas que são geradas em grande quantidade neste processo. Diversos são os estudos de aplicabilidade destes resíduos, como na construção civil, na agricultura, indústria química, etc (SILVA FILHO et al., 2007; MISRA, 2007; KURDOWSKI, 1997). As empresas geradoras de resíduos estão cada vez mais cientes da importância de se investir no desenvolvimento sustentável, visando a competitividade e o lucro (ABAL, 2014). Com esta visão, as empresas produtoras de alumínio no Brasil vêm investindo nos últimos anos cerca de US\$ 60 milhões focando a sustentabilidade (SILVA FILHO, 2007). As indústrias do alumínio buscam alternativas

para viabilizar o estudo de aplicações que focam o uso dos resíduos sólidos gerados para a obtenção da bauxita (ALUNORTE, 2014).

A geração da LV varia em função do tipo de bauxita a ser utilizada no processo, podendo ser 2,5 toneladas de bauxita para 1 tonelada de alumina (IAI, 2008; MISRA, 2007), gerando entre 1 e 1,5 ton de LV. A LV contém em sua composição fases cristalinas e amorfas, constituídas principalmente de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{TiO}_2$  em concentrações variáveis que dependem da natureza da bauxita (ANTUNES, 2011; VIEIRA, 2006).

Dentre as alternativas de aproveitamento da lama vermelha, destaca-se a valorização deste resíduo como material pozolânico, devido ao fato da lama vermelha apresentar em sua composição quantidades de sílica e alumina (SENHADJI et al., 2014). Esta aplicação, de certa forma, está alinhada com a necessidade de suprimento de materiais e reciclagem na indústria da construção civil, principalmente para diminuir a geração de  $\text{CO}_2$  pelo processo de fabricação do clínquer (PACHECO, 2013; VIEIRA, 2006).

A influência da adição de LV calcinada vem sendo estudada no Brasil por diversos pesquisadores. Ribeiro e Morelli (2008) e Montini (2009) observaram a influência da adição de lama vermelha seca no tempo de início e fim de pega do cimento Portland através do aparelho de Vicat e o índice de pozolanicidade do resíduo de acordo com a NBR 5752 de 1992. Os autores destacam que o maior limitador do uso de LV em aplicações estruturais está relacionado com a alcalinidade equivalente disponível na LV, que supera os valores estabelecidos por norma (<1,5%) NBR NM 23. O teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  na LV também é o fator que limita em 1 por cento adição de LV como matéria-prima para fabricação de clínquer (TSAKIRIDIS; LEONARDOU, 2004). Recentemente Minatto (2014) apresentou um estudo onde demonstra que a alcalinidade disponível na lama vermelha calcinada entre 1000 e 1200°C, em composição com argila, pode ser reduzida significativamente. Apesar disso, os valores apresentados não se enquadraram dentro dos limites estabelecidos por norma. A necessidade de incorporação de argila também acaba sendo particularmente interessante devido ao fato de ser um material gerado na construção das bacias de deposição de LV. Estas recentes informações estimulam a busca pelo desenvolvimento de aditivo suplementar para cimento Portland em aplicações estruturais.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Reduzir o teor de alcalinidade disponível na lama vermelha calcinada em composição com argila para viabilizar tecnicamente seu uso como material suplementar em cimento Portland para aplicações estruturais.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar e caracterizar as matérias-primas a serem empregadas no desenvolvimento do trabalho;
- Obtenção de aditivo suplementar para cimento (ASC) composto de mistura de lama vermelha e argila via calcinação em forno rotativo;
- Avaliar o efeito da granulometria do ASC sobre a alcalinidade disponível e índice de atividade pozolânica;
- Avaliar comparativamente o desempenho do ASC com *filler* calcário sobre a resistência a compressão de corpos-de-prova de argamassa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BAUXITA

A bauxita (BA) teve seu descobrimento na França em 1821 por Berthier, na localidade de LesBaux. No Brasil, há trinta anos, o Estado do Pará iniciou sua atividade na direção da produção de alumínio, com o início da extração de bauxita na região de Trombetas com a Mineração Rio do Norte (ALCOA, 2014).

Segundo Crossley (2001), é uma rocha sedimentar, minério rico em alumínio, que se forma pela transformação química que ocorre nas rochas onde há a presença de silicato de alumínio. Apresenta uma coloração avermelhada e um percentual de alumínio superior a 40% de alumina ( $Al_2O_3$ ) (ABAL, 2007). O teor de alumina contida na bauxita varia entre 50 e 55% sendo que para aproveitar a (BA) essa tem de apresentar um teor mínimo de 30% (ANJOS; SILVA, 1983). É constituída por: hidróxidos de alumínio: diáspora, gibbsita ou hidrargilita, boemita podendo conter também argilominerais, hidróxidos de ferro, óxido de titânio e quartzo (CROSSLEY, 2001).

A cor avermelhada da bauxita é devida a presença do óxido de ferro em sua composição, na faixa de 2 a 4% de óxidos de ferro, ao passo que na bauxita vermelha essa proporção atinge 25% (RAMOS, 2008).

As reservas mundiais de bauxitas estão distribuídas nas regiões tropicais (57%), mediterrânea (33%) e subtropicais (10%), sendo a Austrália com 40% e o Brasil 8% (IAI, 2008). A reserva da bauxita no Brasil tem seu maior percentual na região nordeste com cerca de 73% (DNPM, 1984). A bauxita serve de matéria prima para a fabricação de sulfato de alumínio, cimentos aluminosos, de abrasivos, etc. (MARTINES, R. A. C. 2004). Entretanto, a principal finalidade da bauxita é para produção de alumínio metálico, cerca de 95% do volume extraído (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2013).

Para esta finalidade, a bauxita passa por um processo de refino, denominado de processo Bayer, para obtenção de Alumina. A produção mundial da (BA) em 2011 alcançou a marca de 259 milhões de toneladas. O país que obteve maior produção foi a Austrália que em 2012 atingiu a marca de 70 milhões de toneladas. O Brasil que está na 4ª colocação, alcançou uma produção de 35 milhões de toneladas em 2011, alcançando em 2012 a marca de 37 milhões de toneladas (ABAL, 2014).

## 2.2 ALUMINA

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de alumina e sua distribuição da produção em 2008 é mostrada conforme Tabela 1. Os maiores produtores de alumina em 2011 foram:

- 1º - China, 34 milhões de toneladas;
- 2º - Austrália, 18 milhões de toneladas;
- 3º - Brasil, 10,3 milhões de toneladas;
- 4º - Estados Unidos, 4,7 milhões de toneladas;
- 5º - Índia , 4,3 milhões de toneladas;
- 6º - Rússia, 3,5 milhões de toneladas;

No ano de 2012 o Brasil passou a produzir 12 milhões de toneladas. A Tabela 1 mostra a distribuição da produção por empresa e por estado.

Tabela 1 - Distribuição da Produção de Alumina e Localização por Empresa em 2008. (Unidade: 1000 Ton).

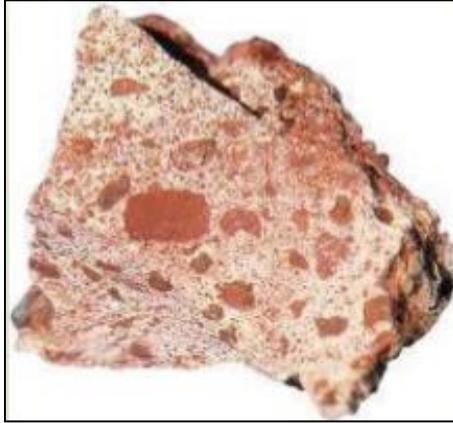
Empresa /UF	Produção	(%)
Alcan Alumínio do Brasil S.A – MA	145	2,0
Alcoa Alumínio S.A	1165	16,40
– MG	375	5,30
– MA	790	11,10
Alunorte- Alumina do Norte do Brasil S.A - PA	4285	60,10
BHP Billition Metais S.A – MA	528	7,40
CBA- Cia. Brasileira de Alumínio – SP	882	12,40
Novelis Brasil Ltda – MG	120	1,70
Total:	7125	100,00

Fonte: Associação Brasileira do Alumínio – ABAL (2008).

Para produzir a alumina, a BA que é uma rocha sedimentar apresentada na Figura 1 passa por transformações. Minério rico em óxido de alumínio formado através de milhões de anos pela transformação química produzida nas rochas que contém silicato de alumínio. O processo de transformação inicia-se na extração na forma de rocha conforme Figura 1 e 2.

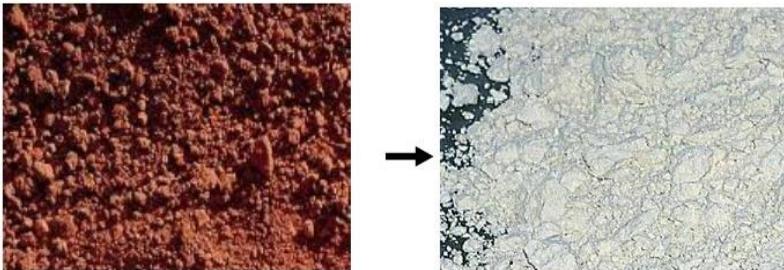
Após é submetida a um processo de moagem para diminuir sua granulometria, utilizando-se do processo Bayer, possibilitando a obtenção da alumina em forma de pasta, tendo como resíduo a LV.

Figura 1 - Bauxita, Rocha sedimentar.



Fonte: Alunorte.

Figura 2 - Bauxita moída e Alumina em pasta.



Fonte: CBA (2008).

### 2.3 PROCESSO BAYER

O processo Bayer para obtenção de alumina a partir da extração da bauxita foi desenvolvido e patentado por Karl Joseph Bayer em 1888 (RIBEIRO et al., 2011).

A obtenção da bauxita tem seu início no processo de extração mineral por meio de equipamentos mecânicos, sendo transportada da jazida para o beneficiamento, passando pelo processo de moagem, digestão propriamente dita com uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH), sob temperatura e pressão (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

O minério inicialmente passa por um processo de britagem / moagem e separação para eliminação de grande parte da caulinita e para concentração dos minerais de alumínio.

Após este processo, o minério lavado é transportado até a refinaria, onde passa por um processo de lixiviação alcalina (digestão) (HILDEBRANDO et al., 2006). Na digestão a BA é lixiviada em uma solução de aluminato de sódio com alta concentração de soda cáustica, sob determinadas condições de pressão, temperatura e tempo de residência. Essas variáveis são dependentes das características mineralógicas do material (PASSOS, 2007). A medida que ocorre a solubilização dos hidróxidos de alumínio e da caulinita, o licor passa a ficar saturado em sílica (SANTOS, 2006).

A rocha bauxita compõe-se de uma mistura impura de minerais de alumínio e os mais importantes são gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , diásporo  $\text{AlO}(\text{OH})$  e boehmita  $\text{AlO}(\text{OH})$ , sendo que para realizar a digestão as temperaturas variam para cada material entre  $150^\circ\text{C}$  e  $245^\circ\text{C}$  juntamente com altas pressões (ANTUNES, 2011).

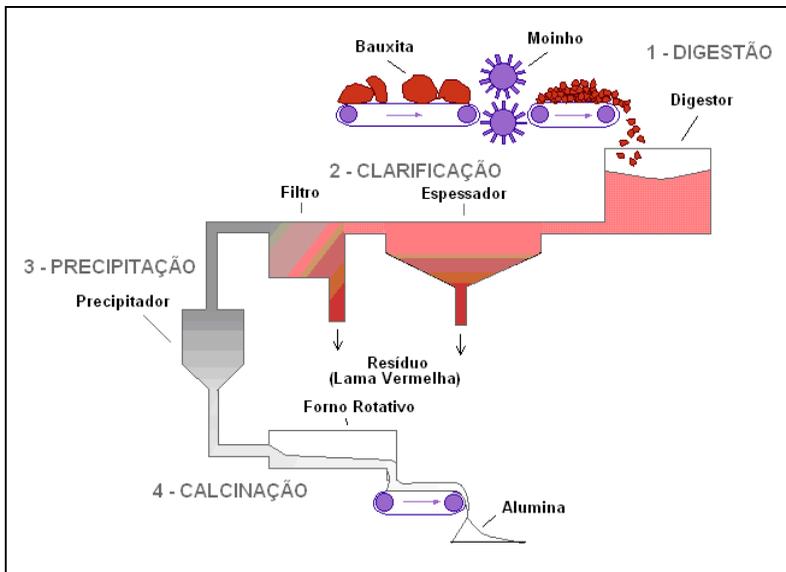
Após essa digestão, a polpa resultante segue para o processo de redução em uma série de reatores a pressão, espessadores e filtros prensa (ANTONIASSI, 2010).

A solução resultante segue para as torres de resfriamento e até os precipitadores onde a alumina trihidratada é então cristalizada. Esta etapa de precipitação é acelerada pela adição de sementes, material fino obtido em uma etapa de classificação posterior à precipitação (PASSOS, 2007).

Em seguida, o produto é filtrado, lavado, secado e calcinado, obtendo-se então a alumina sob a forma pura. O fluxograma da Figura 3 ilustra todas as etapas do ciclo relativo ao processo Bayer.

Os minerais atacados na lixiviação são os principais minerais do alumínio, presentes na bauxita (SANTOS, 2006). No Brasil as refinarias em operação estão localizadas nas regiões norte e sudeste. O processo Bayer substituiu o processo Le Chatelier, que por razões econômicas deixou de ser empregado (RAMOS, 2008).

Figura 3 - Fluxograma e Esquema do Processo Bayer.



Fonte: Adaptado de WAO (2013).

No processo de digestão parte dos minerais que contêm o alumínio são dissolvidos gerando uma lama que devido a sua cor chama-se de lama vermelha (LV) ou resíduo de bauxita (RB) (SANTOS, 2006).

A LV é removida por filtragem na fase de clareamento do minério e depositada em lagoas (ANTUNES, 2011).

Quando a bauxita não é aplicada para fins metalúrgicos, a mesma exige baixo teor de álcalis, sendo separada magneticamente com o uso de um campo magnético superior a 1,5 T, utilizando os métodos pragmáticos (ISAIA, 1995).

As operações unitárias do circuito de beneficiamento da bauxita são as seguintes:

- Formação de uma polpa com 25% de sólidos com minério de bauxita seguida de atrição e classificação, a úmido, em 74 um, para remoção da fração fina;
- Separação magnética para remoção de  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$ ; filtragem, para elevar a percentagem de sólidos de 25 para 60%, seguida de secagem em vaporizador (*spray dry*), obtendo um produto final com 5% de umidade;

- Extrusão, quando necessária, e calcinação da bauxita beneficiada, seguida do acondicionamento do produto para expedição.

Após o processo de lixiviação alcalina surge uma polpa que é constituída por um licor rico em alumina que contem sílica e uma LV contendo os minerais inertes ao processo de digestão (RIBEIRO, 2008).

A concentração, temperatura e pressão, variam conforme a propriedade da Bauxita. A temperatura de trabalho para obtenção está na faixa de 200 e 240°C enquanto a pressão é de 30 atm (WAO, 2003), obtendo o licor verde contendo alumínio dissolvido.

A equação abaixo mostra o resultado do processo:



A classificação e separação do resíduo sólido insolúvel e o líquido são muito importantes, onde ocorre espessamento e posterior filtração (VIEIRA, 2006). O espessamento é um processo de decantação, em que o resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores/lavadores (SILVA FILHO; ALVES, 2006). O objetivo destas unidades é adensar o resíduo, aumentando seu teor de sólidos, para recuperar a maior quantidade de NaOH possível e fornecer um “overflow” para a filtragem (WAO, 2003). Nesta fase é comum a adição de polímeros (como hidroxamatos e poliacrilamida) para induzir a floculação das partículas nos espessadores ou até mesmo a utilização de processos de separação com membranas poliméricas (GÓIS; LIMA; MELO, 2003).

Em seguida, ocorre a etapa de precipitação, quando se dá o esfriamento do licor verde. Após este esfriamento é feita adição de uma pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação, em uma operação reversa à digestão, Eq. (2).



A alumina cristalizada é encaminhada para a calcinação e o licor residual contendo NaOH e alguma alumina é recirculada para a etapa de digestão (HIND et al., 1999).

A calcinação é a etapa final do processo, em que a alumina é lavada para remover qualquer resíduo do licor e posteriormente seca.

Em seguida a alumina é calcinada a aproximadamente 1000 °C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco, Eq. (3) (HIND et al., 1999; ABAL, 2007; WAO, 2003).



#### 2.4 LAMA VERMELHA (LV)

A lama vermelha é composta por óxidos insolúveis de ferro, quartzo, alumino-silicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio, dióxido de titânio. Formada durante o refino da alumina, ao passar por uma lavagem e processo de sedimentação com fluxo de água em contra corrente e posterior deságue para a recuperação do NaOH (RIBEIRO, 2010). Devido a seu elevado pH, a LV é considerado "perigosa" (GÓIS et al, 2003). A geração mundial é de cerca de 90 milhões de toneladas (WANG et al., 2008).

Segundo Silva Filho (2007), os custos para o gerenciamento da LV representam grande parte dos custos de produção da alumina e custos ambientais associados à disposição da LV também são altos. A disposição da LV ainda é um grande problema para a indústria de beneficiamento do alumínio.

A LV tem sua composição química e mineralógica com variações que dependem da região onde é extraída, sendo um material complexo, bem como o processo tecnológico de obtenção (RIBEIRO et al., 2011). Segundo a World Aluminium Organization (2003), as propriedades físicas e químicas dependem inicialmente da bauxita utilizada. A Tabela 2 contém a composição típica da lama vermelha em diversos países. Pode-se observar que a soma dos óxidos de alumínio, silício e ferro varia entre 53 a 94%, sendo que grande parte é maior que 70%. Elevadas temperaturas de calcinação provocam o aparecimento de fases cristalinas que diminuem substancialmente a reatividade das lamas (GOUVEIA, 2006).

Tabela 2 - Faixa de variação da composição química da lama vermelha.

Composto	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>
Teor (%)	30 – 60	10 – 20	3 – 5	2 – 10	2 – 8	Traços – 10

Fonte: World Aluminium Organization – WAO (2003).

Segundo Silva Filho (2007), no Brasil as usinas em operação geram lama vermelha com as composições químicas mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química da LV por diferentes fontes (%).

Composto	ALUNORTE	ALCOA	CBA	ALCAN Canadá	ALCOA Austrália	ALCAN África
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,50	35,67	36,70	37,60	25,45	26,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,16	33,78	29,89	32,45	34,50	48,40
SiO <sub>2</sub>	2,34	3,45	6,78	3,67	17,06	5,50
TiO <sub>2</sub>	6,18	4,56	5,67	4,12	4,90	2,80
Na <sub>2</sub> O	8,49	9,67	7,89	6,78	2,74	2,40
CaO	1,23	2,34	1,20	3,45	3,69	-
MgO	-	-	-	-	-	-
PF (perda ao fogo)	11,19	11,24	12,35	9,80	12,90	14,60

Fonte: Silva Filho, Alves e Da Motta (2007).

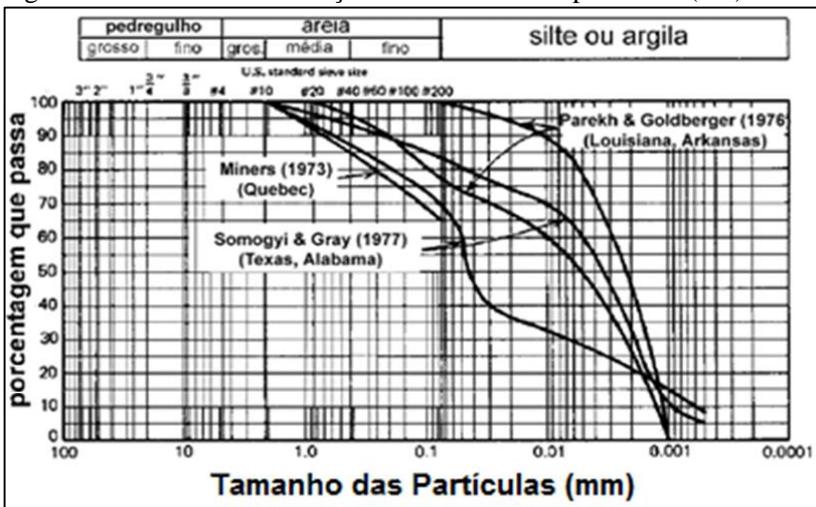
Analisando a tabela de composição química da LV (Tabela 3) percebe-se que o teor de Na<sub>2</sub>O das lamas produzidas pelas empresas do Brasil varia de 7,8 – 9,6 por cento. A LV extraída na África apresenta o maior teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cerca de 48,40 por cento em comparação com Austrália e o Canadá.

Das empresas que operam no Brasil a LV de maior teor de Na<sub>2</sub>O encontra-se na produzida pela ALCOA, 9,67 por cento. A empresa CBA apresenta o maior percentual de SiO<sub>2</sub> quando comparadas com as demais empresas de extração, 6,78 por cento, enquanto que na Austrália este percentual atinge 17,06 por cento.

Em termos de composição mineralógica a LV encontrada na região norte do Brasil pode ser classificada em duas. Aquelas provenientes da própria bauxita, tais como: a gibbsita, devido a bauxita ser de origem gibbsítica; ainda da presença de hematita, goetita, anatásio, quartzo. E a presença de fases minerais formadas durante o processo Bayer, sendo estas zeólitas de sódio, tais como a sodalita e a cancrenita (HILDEBRANDO et al., 2006).

De acordo com Villar (2002), a granulometria da lama vermelha é uma característica que está estritamente relacionada a mineralogia da rocha de origem, ao processo de extração, ao processamento e deposição (adição de flocculantes), como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Curvas de distribuição dos tamanhos de partículas (LV).



Fonte: Villar (2002) adaptado de VICK (1983).

A lama vermelha quando seca, apresenta massa específica de 2,5 à 2,7 g/cm<sup>3</sup>, podendo variar de acordo com a sua origem (SILVA et al., 2007).

Ribeiro (2011) observou que a área específica da lama vermelha varia de acordo com a temperatura de calcinação.

A LV por ter uma natureza cáustica elevada é classificada como um resíduo perigoso pela ABNT, e deve ser neutralizada antes de ser transportada (VIEIRA, 2006). A Environmental Protection Agency (EPA) classifica a LV como sendo um rejeito não perigoso. A NBR 10004-2004 classifica os resíduos quanto aos seus riscos ambientais. Para classificar a lama vermelha como um resíduo perigoso ou não perigoso é necessário às caracterizações quanto à corrosão e toxicidade.

A variedade da composição química da LV esta relacionada com diferentes metodologias de ensaios de avaliação, dependendo do tipo de tratamento e origem da mesma (RIBEIRO, 2011). Vários são os autores que classificam a LV como material perigoso e nocivo ao meio ambiente por possuir metais pesados na sua composição química e elevada corrosividade. Assim aumentou o número de pesquisas científicas para o uso deste rejeito em associação ao cimento (LABRINCHA, 2012; LIBERATO et al., 2009; ANTUNES; CONCEIÇÃO; NAVARRO, 2011).

## 2.5 APLICAÇÃO DA LAMA VERMELHA NO CIMENTO PORTLAND

De acordo com dados encontrados na literatura, diversas fases mineralógicas têm sido identificadas na constituição da lama vermelha por difratometria de raios X. Dentre elas: hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), goethita ( $\text{FeOOH}$ ), hidróxido de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), bayerita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), haloisita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), boemita ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ ), diásporo ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ), gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), perovskita ( $\text{CaTiO}_3$ ), sodalita ( $\text{Na}_2\text{OAl}_2\text{O}_3 \cdot 68\text{SiO}_2 \cdot 17.73\text{H}_2\text{O}$ ), cancrinita sódica ( $\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot 2\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), katoita ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{SiO}_2(\text{OH})_{12}$ ) e gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), dentre outras (GRÄFE; KLAUBER, 2011).

A LV sem tratamento apresenta como fases cristalinas: hematita, goethita, gibbsite, boemita, quartzo, calcita, soldalita, caulinita, rutilo e silicatos de sódio e alumínio, todas fases coerentes com a análise química do material.

A hematita é um óxido muito estável, podendo ser o estágio final da transformação de outros óxidos de ferro (COSTA et al., 2006). Pesquisas têm sido desenvolvidas visando à valorização da lama vermelha para produção de novos materiais, principalmente em materiais da construção civil. Na Tabela 4 encontra-se uma síntese dos principais estudos realizados em diferentes países com a valorização da lama vermelha para a produção de novos materiais.

Tabela 4- Estudos de valorização da lama vermelha.

Referência	País	Materiais produzidos com lama vermelha
Sglavo et al. (2000)	Itália	Produtos cerâmicos (colorante)
Kavas (2006)	Turquia	Tijolos queimados produzidos com resíduos provenientes da indústria de boro
Yalçın e Sevinç (2000)	Turquia	Placas cerâmicas, artigos sanitários, porcelanas e eletro porcelanas (isoladores de alta tensão)
Yang e Xiao (2007)	China	Tijolos sem queima, produzidos com cinzas, areia, cal, gesso e cimento Portland
Yang et. al (2009)	China	Telhas cerâmicas
Gordon et al. (1996)	Jamaica	Compósito cimentício (cal hidratada, microssílica, calcário)
Singh et al. (1996)	Índia	Clínquer
Tsakiridis e Leonardou (2004)	Grécia	Clínquer
Vangelatos et al. (2009)	Grécia	Clínquer

Martins et al. (2008)	Brasil	Clínquer e pozolana (lama seca)
Ribeiro e Morelli (2008)	Brasil	Pozolana (lama seca)
Rossi et al. (2008)	Brasil	Agregado graúdo
Sotero et al. (2009)	Brasil	Blocos de concreto para pavimentação
Pera et al. (1997)	França	Concreto colorido (lama como pozolana)
Pera e Pera (2000)	França	Concreto auto-nivelante (lama como agente de viscosidade) e concreto colorido (lama como pozolana)

Fonte: Manfroi (2009).

Nos principais estudos para a aplicação da LV em matriz cimentícia destacam-se a produção de clínquer e material pozolânico. A sílica e a alumina são os principais compostos estudados, sendo que esses reagem com hidróxido de cálcio, formando compostos hidratados que aumentam a resistência da pasta de cimento (MANFROI, 2009). A Tabela 5 mostra o estudo de Tsakiridis e Leonardou (2004), que investigaram o uso clínquer com adição de LV da Grécia para a fabricação de cimento Portland.

Tabela 5 - Composição química da lama vermelha (%) gerada em diversos países.

Referência	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	LOI	País
Wang et al (2005)	60,00	15,00	5,00	16,00	5,00				0,00	Austrália
Park et al (2002)	16,60	23,70	22,90	11,60	6,70		6,70		11,80	Coréia
Altundogan et al(2002)	36,94	20,39	15,74	10,10	4,98		2,23		8,19	Turquia
Gordon et al (1996)	48,50	16,40	3,90	1,70	6,70		6,20		13,10	Jamaica
Kuomanova et al(1997)	48,40	26,60	5,50		2,80	0,90	1,20		14,60	Guiné
Piga et al (1995)	31,60	25,30	13,20	7,70	12,10		7,70		0,00	Itália
Pera et al (1997)	26,62	15,00	4,98	1,02	15,76	0,95	22,21	0,02	12,10	França
Hildebrando et al (2006)	40,20	19,10	19,90	9,01	3,07	0,04	1,23	0,12	9,12	Reg Norte BR
Ribeiro e Morelli(2008)	39,45	29,98	1,91	17,13	2,26		6,88	0,28	0,00	Brasil

Fonte: Adaptado de SILVA FILHO et al. (2007).

Singh et al. (1997) em sua pesquisa para encontrar a composição química correta, realiza a queima de 5 corpos de prova a 1250°C durante duas horas, obtendo assim os dados mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Composições das diferentes misturas calcinadas à 1250 °C (2 horas).

	Cal	Gesso	LV	Bauxita	Cinza Volante
Série A	65,0	-	0 - 35,0	-	35,0 - 0
Série B	50,0	-	5,0-50,0	45,0 - 0	-
Série C	47,5	7,5	0 - 45,0	45,0 - 0	-
Série D	50,0	25,0	0 - 25,0	-	25,0-0
Série E	35,0	10,0	5,0-30,0	45,0-20,0	5,0

Fonte: Singh et al. (1997).

Segundo Tsakiridis e Leonardou (2004) em sua pesquisa para usar a LV da Grécia para produzir clínquer na fabricação de cimento Portland obtiveram as informações conforme Tabela 7. Os autores produziram clínquer sem adição de LV para posterior comparação.

Tabela 7 - Composição dos clínquers.

Amostras	Composição (%)					
	Calcário	Xisto	Bauxita	Areia Milos	Areia Fundição	LV
(CP) <sub>Ref</sub>	75,28	14,30	4,50	5,73	0,20	0,00
(CP) <sub>LV</sub>	74,80	11,40	3,00	7,30	0,00	3,50

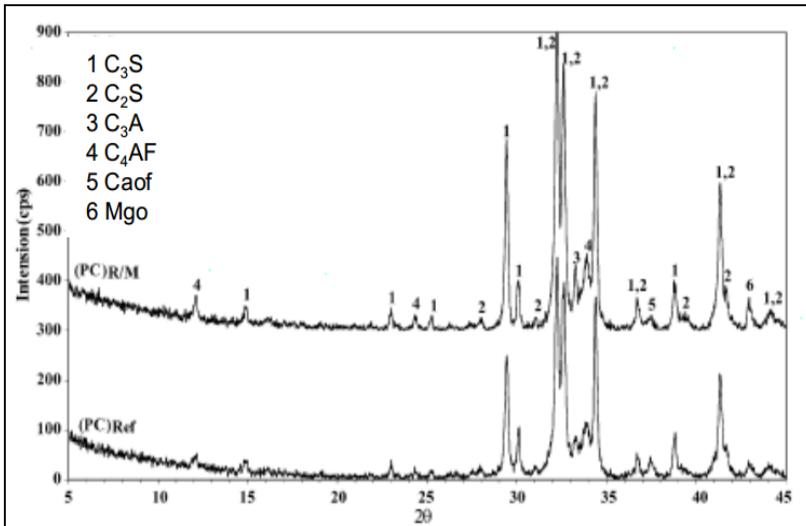
Fonte: Tsakiridis, Leonardou (2004).

Ao comparar as amostras observa-se que o percentual de areia da LV é superior ao da referência em 27 por cento.

A mostra de referência apresenta maior percentual de xisto cerca de 25 por cento, enquanto o calcário contido na referência é superior em 0,06 por cento ao da LV.

Na Figura 5, é mostrado o difratograma dos clínquers produzidos e suas fases.

Figura 5 - Difratoograma do cimento Portland produzido com clínquer natural e clínquer com adição de lama vermelha.



Fonte: Tsakiridis, Leonardou (2004).

As principais fases mineralógicas do clínquer das duas misturas são: C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, apresentando-se bem formadas.

Segundo Ribeiro (2011 (b)), a calcinação a 1000°C provoca alteração da área superficial, densidade e da massa unitária, devido à perda da água absorvida e formação de novas fases, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Efeito da temperatura de calcinação nas principais propriedades físicas da lama vermelha.

Temperatura de Calcinação	Área Superficial (m <sup>2</sup> /g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )
Natural	20,29	2,90	0,64
450°C	21,55	2,91	0,62
650°C	20,93	3,00	0,59
1000°C	3,60	3,27	0,56

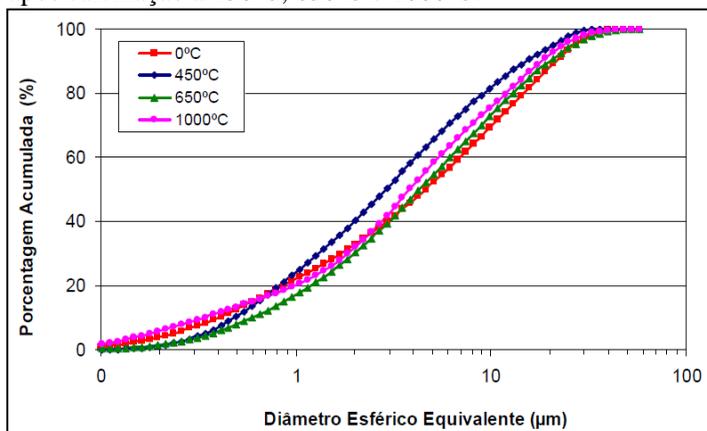
Fonte: Ribeiro (2011).

Observa-se na Tabela 8 que a área superficial de LV é elevada, indicando ser um resíduo muito mais fino que o próprio cimento Portland (RIBEIRO, 2011(b)). A tabela 8 mostra que com o aumento da

temperatura de calcinação, as amostras apresentam maior densidade devido a perda de matéria orgânica, descarbonatação, água e estrutural.

A área superficial das amostras quando calcinada a 1000°C apresenta redução cerca de 83%, devido a formação de nefelina leve, aumentando de sua densidade em 12,30%. A distribuição do tamanho de partículas da LV in natura e após calcinação a 450°C, 650°C e 1000°C, estudada por Ribeiro (2011(b)), pode ser observada na Figura 6. Nota-se que o tamanho médio de partículas (D50) da lama vermelha é da ordem de 3,5 µm.

Figura 5 - Distribuição do tamanho de partículas da LV in natura e após calcinação a 450°C, 650°C e 1000°C.



Fonte: Ribeiro (2011(b)).

Muitos são os estudos para utilização e valorização de resíduos do processo da extração da bauxita, Pontikes (2013), pesquisou o uso do resíduo da bauxita em cimento. Espera-se também, que a valorização da lama vermelha como material pozolânico represente uma alternativa capaz de melhorar a qualidade dos materiais cimentícios e proporcionar uma redução do volume da lama vermelha armazenada (COSTA et al., 2006).

O estudo do aproveitamento dos resíduos gerados cada vez mais se faz necessário, principalmente na construção civil, em virtude da produção industrial de matérias primas que geram produtos que causam danos ao meio ambiente (PONTIKES, 2013).

Estudos mostram que a LV apresenta importantes propriedades para ser utilizada como meio absorvente, pois possui características

similares a de outros absorventes alternativos como argilas orgânicas, tendo como vantagem ser um resíduo descartável com grande volume cuja utilização em processos ambientais poderá contribuir duplamente para mitigar questões de poluição do meio ambiente. Na Tabela 9 pode-se perceber que não há significativa modificação na composição química da lama vermelha em função da temperatura de calcinação estudada por (RIBEIRO, 2011(b)).

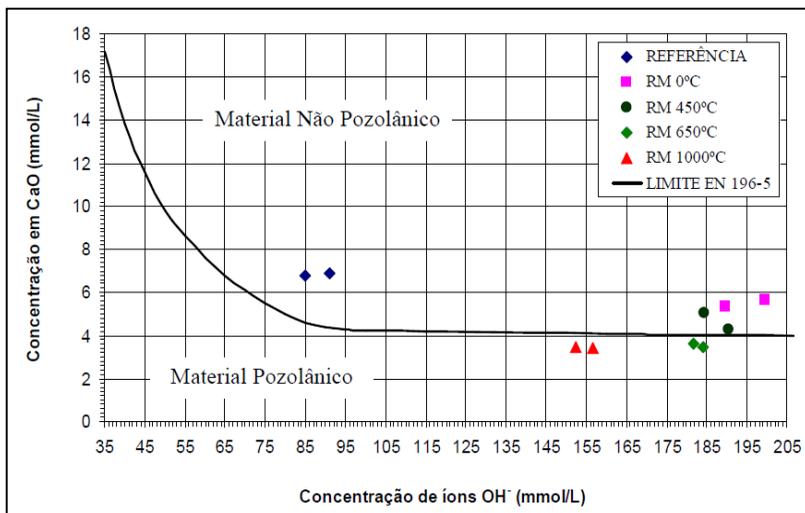
Tabela 9 - Composição química da lama vermelha calcinada a diferentes temperaturas obtida por fluorescência de raios X (FRX).

Tempe- ratura	Teor (%)										
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Outros	PF
Natural	19,87	19,87	7,35	4,61	14,34	1,87	0,21	2,66	0,34	1,67	27,2
450°C	29,74	22,43	11,36	5,47	20,95	2,41	0,50	3,29	0,52	2,13	1,2
650°C	30,40	22,00	11,60	5,60	21,80	2,56	0,48	3,28	0,21	2,08	0,0
1000°C	30,80	21,50	12,10	5,40	21,20	2,60	0,48	3,17	0,54	2,21	0,0
Após correção da perda ao fogo (PF)											
Natural	27,30	27,30	10,10	6,33	19,70	2,57	0,29	3,65	0,47	2,29	-
450°C	30,10	22,70	11,50	5,54	21,20	2,44	0,51	3,33	0,53	2,16	-
650°C	30,40	22,00	11,60	5,60	21,80	2,56	0,48	3,28	0,21	2,08	-
1000°C	30,80	21,50	12,10	5,40	21,20	2,60	0,48	3,17	0,54	2,21	-

Fonte: Ribeiro (2011).

A atividade pozolânica segundo a NP EN 196-5 é medida comparando-se a quantidade de hidróxido de cálcio presente em solução aquosa em contato com o cimento hidratado após 14 dias com a quantidade de hidróxido de cálcio necessária para saturar o ambiente de igual alcalinidade. O material é considerado pozolânico se a concentração de hidróxido de cálcio em solução for menor que a concentração de saturação. A Figura 7 mostra a pozolanicidade das misturas estudadas por (RIBEIRO, 2011(c)).

Figura 6 - Pozolanicidade das Misturas.



Fonte: Diagrama de determinação da pozzolanicidade segundo a norma NP EN 196-5 (RIBEIRO, 2011(c)).

Na Figura 7 pode-se perceber que somente as misturas calcinadas a 1000°C e 650°C apresentam-se como material pozzolânico, sendo a concentração em CaO em ambas as temperaturas muito próximas variando somente a concentração de íons OH<sup>-</sup>, e constata-se que a temperatura tem forte influência nesta concentração.

Segundo Ribeiro (2011) a adição da lama vermelha provoca a diminuição da tensão de escoamento e um aumento da viscosidade plástica da argamassa em função da hidratação do cimento. A lama vermelha não calcinada aditivada no concreto para aplicações não estruturais substitui parcialmente o cimento.

A resistência mecânica diminui com o aumento das proporções de lama vermelha no lugar do cimento, mas argamassas preparadas com a substituição de 50% ainda apresentam resistência adequada para aplicações não-estruturais (RIBEIRO, 2011), (COSTA et al., 2006).

O elevado pH da lama vermelha proporciona uma maior proteção à armadura do concreto, o que é refletido no baixo potencial de corrosão da armadura e elevada resistividade elétrica (efeito filler) do concreto (ISAIA, 1995).

Na mistura, a presença da lama vermelha diminui a expansão da reação com MgO e o CaO (COSTA et al., 2006).

A LV mesmo contendo álcalis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^+$ ) que causam reações expansivas, não compromete o uso deste resíduo em substituição parcial do cimento portland (RIBEIRO, 2008).

A LV gerada pelo processo Bayer é o resíduo sólido de maior volume gerado pelas indústrias do alumínio. Gerenciar todo esse resíduo que apresenta elevado teor de sódio residual do processamento e alta alcalinidade requer um grande esforço das mineradoras. Pois que representa um grande problema ambiental.

Além da LV também tem a argila de descarte (AD) que é gerada em grande volume. Em função da necessidade de se aproveitar estes rejeitos, surgiu a oportunidade de se estudar a introdução dessa LV juntamente com a AD para uso como material cimentício. Os depósitos para esses rejeitos requerem grandes áreas com elevados custos sem levar em consideração o elevado risco de contaminação ambiental. Aplicar a LV e a AD em substituição ao cimento, no caso em estudo o CPV-ARI, pois não apresenta adição de pozolana em sua composição química.

## 2.6 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, ligantes que quando misturado com água endurece. Dos componentes do concreto o cimento é o principal elemento, sendo que este é responsável pela união entre os demais agregados que compõe o concreto até a obtenção do produto final (MEHTA, 1994).

Dentre os tipos de cimento, o portland é um dos mais importantes e mais empregados nas construções (ABCP, 2002). Por definição, é um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer Portland, gesso e adições normalizadas finamente moídos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O cimento é composto de clínquer e de adições, sendo o clínquer o principal componente, presente em todos os tipos de cimento (BAUER, 1979). O clínquer tem como matérias-primas básicas o calcário e a argila (ISAIA, 1995(b)).

Os tipos de cimentos dependem do tipo de uso. Estes podem ser divididos em três grupos principais: a) cimentos endurecidos ao ar b) endurecidos em água e c) resistentes a ácidos. Sua fabricação é feita de acordo com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

O cimento depende, principalmente, para sua fabricação, dos seguintes materiais: calcário, argila, minério de ferro e gesso (ABCP,

2002). A fabricação do cimento envolve as seguintes operações: dosagem, secagem e homogeneização das matérias-primas, clínquerização, mineralogia do clínquer, adições finais e moagem (MEHTA, 1994).

O processo de clínquerização, consiste na utilização do pó ainda cru, moído e calcinado até fusão. A uma temperatura de 1450°C em um forno rotativo, onde então obtém-se o clínquer (ISAIA, 1995).

Quanto a mineralogia do clínquer: a reação no interior do forno entre a sílica, a alumina, o ferro e cal formam o clínquer cujos componentes são os seguintes: 01) -  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  Silicato tricálcico = ( $\text{C}_3\text{S}$ ) 18 a 66% no cimento. 02) -  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  Silicato dicálcico = ( $\text{C}_2\text{S}$ ) 11 a 53% no cimento. 03) -  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  Aluminato tricálcico = ( $\text{C}_3\text{A}$ ) 05 a 20% no cimento 04)-  $4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  Ferro aluminato tetracálcico = ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) 04 a 14% no cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A resistência à compressão é uma das características mais importantes do cimento e é determinada em ensaio normal descrito na NBR 7215-1992. O ensaio é realizado em corpo-de-prova cilíndrico de 05 cm x 10 cm, feito com argamassa de traço 1: 3: 0,48, com areia padronizada e submetida à ruptura em idades pré-definidas. As classes de resistência do cimento são 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa. Os cimentos de alta resistência inicial, CP V-ARI, têm resistência mínima aos 07 dias de 34 MPa. Os teores de adições dos tipos de cimento e clínquer são determinados pela ABNT, com base na Tabela 10, que determina a composição.

Tabela 10 - Tipos de Cimento fabricados no Brasil .

Tipo	Classe	Cl+Gesso (%)	Escória (%)	Pozolana (%)	F. Calcário (%)
CP I CP I-S	25	100	-	-	-
	32	95 - 99			
	40				
CP II-E	25	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10
CP II-F	32	90 - 94	-	-	6 - 10
CP II-Z	40	76 - 94	-	6 - 14	0 - 10
CP III	25	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5
	32			-	
	40			-	
CP IV	25	45 - 85	-	15 - 50	0 - 5
	32	-	-	-	
CP V-ARI	-	95 - 100	-	-	0 - 5
CP V-ARI RS	-	75 - 85	-	-	0 - 5

Fonte: ABCP (2002).

Os tipos de cimentos fabricados no Brasil seguem as normas da ABNT. O cimento CP IV-32 tem baixo calor de hidratação, sendo assim, é muito recomendado para a concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. Possui um alto teor de pozolana, na faixa de 15 a 50%, estável para o uso em agregados reativos. É recomendado também em ambientes que sofre a ação de ataques ácidos, principalmente no combate aos sulfatos (BAUER, 2005; NIVELLE, 1997). É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto para pavimentos e solo-cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O CP V – ARI possui alta resistência inicial, tem alta reatividade em baixas idades, em função do grau de moagem a que é submetido (ABCP, 2002). O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado, tornando-o mais fino, com maior superfície específica (FARIAS, 2007). Sua resistência aumenta até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento ao concreto. Sendo largamente utilizado em produção industrial de artefatos, onde se exige dêsfoma rápida, concreto pretendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Por ter alto calor de hidratação, não é indicado para concreto massa, sendo que este contém adição de até 5% de fíler calcário. A ausência de pozolana não o torna indicado para concreto com agregados reativos (BAUER, 1979).

O cimento CP V – ARI – RS, possui uma resistência inicial alta a sulfatos, sendo que isso ocorre em baixa idade, devido ao grau de moagem. O clínquer usado em sua fabricação é o mesmo na fabricação do cimento convencional (FARIAS FILHO, 2007).

Sua finura está relacionada ao maior tempo de moagem ao qual é submetido. Com maior superfície específica, a sua resistência aumenta até 28 dias, e este valor é mais elevado do que os demais proporcionando maior rendimento ao concreto. Este é utilizado em produção industrial de artefatos, concreto pretendido pré e pós-tensionado pisos industriais, argamassa armada e concreto dosado em central. Sendo resistente a sulfatos em função da adição de cinza pozolânica (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Ainda para Mehta e Monteiro (1994), as principais vantagens no emprego das pozolanas na fabricação do cimento pozolânico são: a economia no custo do cimento, maior trabalhabilidade, menor calor de hidratação, menor permeabilidade, menor segregação do agregado.

## 2.7 POZOLANAS

Pozolanas são materiais silicosos ou sílico aluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (ASTM, 125-03). As pozolanas são normalmente utilizadas de duas formas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento, conforme (NETTO apud SANTOS, 2006).

Segundo a NBR 12653/1992, pozolana é um material natural ou artificial que contém sílica em forma reativa, classificando os materiais pozolânicos segundo três classes (Classe N, Classe C e Classe E), sendo que esta classificação é em função da sua origem, requisitos químicos e físicos estabelecidos nesta mesma norma. Ainda, segundo a mesma NBR, os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas respectivamente na Tabela 10.

Tabela 10 - Exigências Químicas e Físicas da NBR 12653/1992.

Propriedades Químicas	Classes de Material Pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, percentual máximo	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias em relação ao controle, percentual mínimo	75	75	75
Com o cal aos 7 dias em MPa	6	6	6
Água requerida, percentual máximo	115	110	110
<b>Propriedades Físicas</b>			
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , percentual mínimo	70	70	50
SO <sub>3</sub> , percentual máximo	4	5	5
Teor de umidade, percentual máximo	3	3	3
Perda ao fogo, percentual máximo	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, percentual máximo	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT NBR 12653/1992.

Para que um material possa ser considerado pozolânico, deve satisfazer os requisitos da tabela 11, sendo que o mesmo deve apresentar no máximo 1,5 por cento de álcalis disponíveis em óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) para todas as classes de pozolanas (DIAS, 2010).

O percentual da soma dos óxidos não pode ser inferior a 70 por cento para as classes N e C, para a classe E não pode ser inferior a 50 por cento.

Para as três classes, o percentual de material retido na peneira com malha de 45µm tem que ser no máximo 34 por cento. O IAP para as três classes deve ter percentual mínimo de 75 por cento.

O material pozolânico da classe dos naturais deve apresentar 10 por cento de perda ao fogo. Já os demais, devem apresentar apenas 6 por cento de perda.

Para Montanheiro, Yamamoto e Kihara (2002), as pozolanas naturais são aquelas cuja origem é vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO<sub>2</sub>) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Já as pozolanas artificiais são materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica (NBR 12653/1992), podendo ser divididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais.

O uso de pozolanas em adição ao cimento confere ao concreto e argamassa certas características como: maior durabilidade, inibindo a reação álcali-agregado e diminui o diâmetro dos poros da pasta hidratada reduzindo o ataque por substâncias externas como cloretos e sulfatos (LIMA, 2006), (FEITOSA, 2010). A pozolana proporciona melhorias na resistência ao ataque de ácidos, em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação um C-S-H, com menor relação CaO/SiO<sub>2</sub> de menor basicidade, menor calor de hidratação pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), por reações térmicas (pozolânicas) (SANTOS, 2006).

Segundo Metha e Monteiro (1994) outras vantagens da utilização de pozolanas em concretos com cimento Portland são aumento da trabalhabilidade do material, da resistência à fissuração devido à redução da reação álcali-agregado e maior impermeabilidade. Desta forma, ao se tornar menos permeável sua durabilidade tende a aumentar.

## 2.8 ARGILA

A argila é uma das matérias primas mais usadas pelo setor cerâmico, seja para a fabricação de louças, tijolos ou utensílios decorativos, podendo também ter uso no segmento medicinal (GEREMIAS, 2003). As alterações de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares dão origem às argilas, sendo responsáveis por esta alteração a ação química da água, intempéries e gases de enxofre (MENEZES, 2008).

A argila é um material muito fino que apresenta um comportamento plástico, originando-se de rochas sedimentares muito finas de silicato e alumínio (PAZ, 2010).

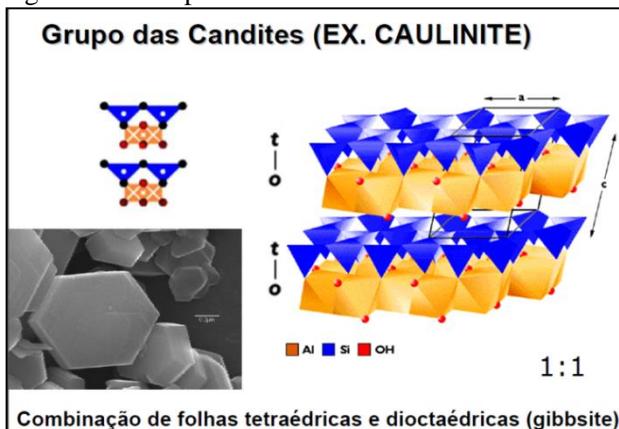
Os principais grupos dos materiais argilosos são: caulinita, ilita, montmorilonita, cloritas, vermiculitas, dos interestratificados, paligorskita e das hormitas minerais (SANTOS, 1989).

As argilas de ocorrência mais comum no Brasil são as caulinitas e ilitas. A Figura 8 mostra o grupo da Caulinita.

A caulinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  apresenta a seguinte composição: 20,90% Al, 21,76% Si, 1,56% H e 55,78% O (BATISTA, 2009).

Os metacaulins são argilas calcinadas compostas basicamente de caulinita como matéria prima de partida.

Figura 7 - Exemplo da caulinita.



Fonte: Grim (1968).

A ilita é o mineral argiloso mais abundante nos xistos argilosos e nos argilitos, ocorre em outras rochas sedimentares, incluindo o calcário (PAZ, 2010). Esta argila tem estrutura semelhante à das micas, mas como tem menos cátions inter-camadas, as suas ligações são mais fracas e existe maior irregularidade no empilhamento (PAZ, 2010).

O argilomineral ilita tem uma configuração estrutural bem próxima da caulinita. O nome do argilomineral ilita se deve à região onde primeiro foi caracterizado, isto aconteceu no estado de Illinois (PAZ, 2010).

Apresenta como composição química típica  $(\text{K}, \text{H}_3\text{O}, (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} [(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$  com os seguintes percentuais: 6,03% K,

1,87% Mg, 9,01% Al, 1,43% Fe, 25,25% Si, 1,35% H, 55,06% O (VIEIRA; SALES; H.F; MONTEIRO, S.N, 2000).

Por ter átomos de metais alcalinos em sua composição estrutural, forma abundante quantidade de fase vítrea mesmo em temperatura de queima relativamente baixa (<1100°C) . Argilomineral não expansivo, pois suas camadas estão rigidamente ligadas (PAZ, 2010). Em qualquer um dos casos durante a exposição de uma argila ao tratamento térmico, a tendência termodinâmica do sistema é a formação de cristais de mulita (MENEZES, 2008).

Esta formação está prevista do diagrama de equilíbrio do sistema  $Al_2O_3 - SiO_2$ , assim como nos sistemas ternários  $Al_2O_3 - SiO_2 - K_2O$  e  $Al_2O_3 - SiO_2 - Na_2O$ , conforme ilustrado na Figura 8. Dessa forma, seja pela formação de fase vítrea, ou seja, pela cristalização de mulita, existe uma justificativa para da alcalinidade disponível da lama vermelha ser reduzida, conforme apresentado por (ANTUNES, 2011).

### 2.8.1 Efeito de adição de Argila sobre a LV Calcinação.

Minatto (2014) estudou o efeito provocado pela mistura de LV e AD, temperatura e tempo de calcinação sobre a alcalinidade e atividade pozolânica. A Tabela 11 mostra os valores de ajustes V, p e F do modelo estudado. Com os dados experimentais o autor obteve um modelo capaz de prever a alcalinidade disponível e índice de atividades pozolânica em função do tempo e da temperatura, equação (A).

$$ADi \text{ ou } IAP = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot t(A)$$

Onde:

$a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  – são as constantes ajustadas ao modelo

T - Temperatura (°C);

t - Tempo (mínimo);

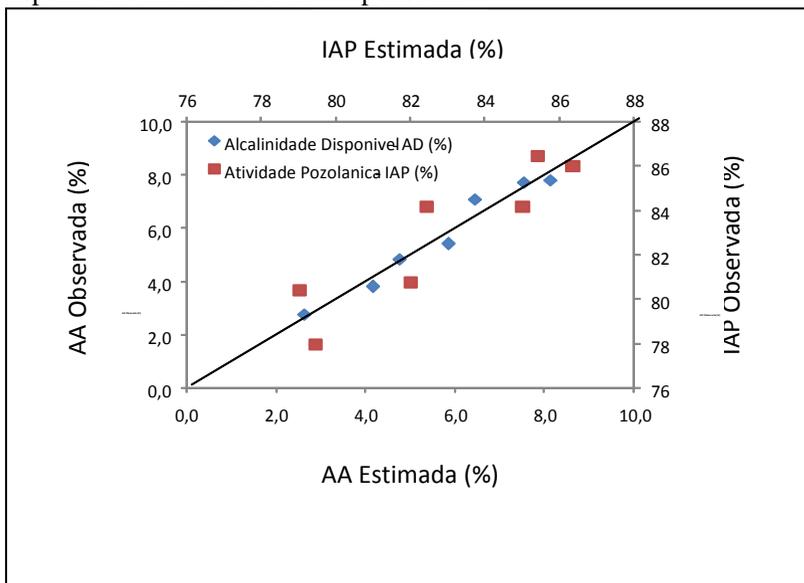
Tabela 11 - Valores de ajustes V e p de significância das constantes e valor F de significância F do modelo.

	ADi		IAP	
F	0,002		0,030	
	V	P	V	P
$a_0$	25,044	0,001	49,2	0,005
$a_1$	-0,017	0,002	0,030	0,020
$a_2$	-0,037	0,023	0,023	0,539

Fonte: Minatto (2014).

Na Figura 9 pode-se comparar os valores do modelo e os observados experimentalmente. Apesar do bom ajuste nas condições experimentais aplicadas, o autor não obteve valores de alcalinidade disponível abaixo daquele previsto em norma. Entretanto, uma extrapolação no modelo permite inferir que seria possível obter os resultados desejados. O autor ainda sugere que misturas com argilas causam um efeito benéfico sobre a redução da alcalinidade disponível.

Figura 8 - Valores previstos e valores observados para a alcalinidade disponível e índice de atividade pozolânica.

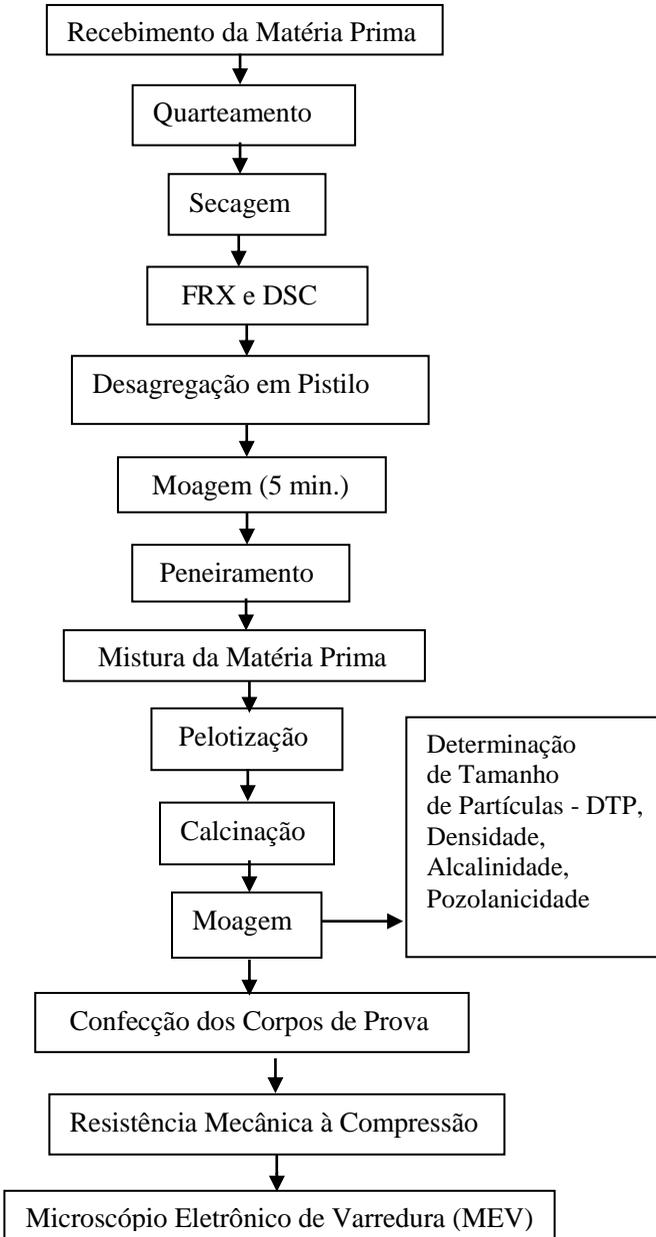


Fonte: Minatto (2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no IParque (UNESC), no Laboratório de Reatores e Processos Industriais (LabRepi) e no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) em conjunto com o grupo VALORA. O fluxograma da Figura 9 apresenta as principais etapas do desenvolvimento experimental da pesquisa.

Figura 9 - Fluxograma do Experimento.



### 3.1 MATÉRIAS-PRIMAS

A lama vermelha LV e a argila de descarte foram coletadas na empresa Alunorte S.A. localizada na cidade de Barbacena, estado do Pará. A empresa é a maior refinaria de alumina do mundo, produção anual de aproximadamente 5,8 Mton de alumina e aproximadamente 5,0 Mton de Lama vermelha. A amostra de argila de 10 kg que foi empregada é proveniente da escavação para abertura do depósito de resíduo sólido (DRS) da mesma empresa. A Lama vermelha, aproximadamente 20 kg, foi obtida a partir de experimento piloto de separação por filtro-prensa, que será a tecnologia a ser implantada pela empresa na operação de separação no futuro.

O cimento utilizado foi o CP-V- ARI fornecido pela empresa Itambé. Este foi escolhido devido ao fato de ser constituído por clínquer e gesso, sem adições pozolânicas ou de calcário. Foi utilizado areia padrão ABNT, Solotest, areia grossa (ABNT 16), média grossa (ABNT 50), Média fina (ABNT 50) e fina (ABNT 100).

Além destes materiais, foram empregados os seguintes reagentes em grau analítico: hidróxido de cálcio teor 95% da empresa Vetec, ácido clorídrico PA 37% - Vetec, Carbonato de sódio teor 99,5%- Synth, Alaranjado de metila PA – Nuclear Solução de Hidróxido de sódio PA 99%- Vetec, Sulfato de sódio 99% - Vetec. EDTA – Ácido Etilenodiamino Tetra-acético.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As composições químicas do cimento, lama vermelha, argila de depósito e carbonato de cálcio foram determinadas por fluorescência de raios X (FRX) utilizando o equipamento da marca Philips, modelo PW 2400. Para a determinação das fases foi utilizado o método de difratografia de raios X (DRX) da marca SHIMADZU, modelo XRD-6000, operando a 30 kV e 30 mA. A varredura foi realizada entre  $10^\circ$  ( $2\theta$ ) e  $80^\circ$  ( $2\theta$ ) com velocidade de  $2^\circ/\text{min}$ .

A caracterização térmica da lama vermelha e argila de depósito foi realizada por dilatometria óptica utilizando o equipamento HSM ODHT 1600-1650 Expert System Solutions S.r.l até o ponto de fusão. A taxa de aquecimento foi de  $40^\circ\text{C}/\text{min}$ , atingindo a fusão aproximadamente em  $1145^\circ\text{C}$ .

A análise térmica gravimétrica e calorimetria diferencial foram realizadas por equipamento SDT Q600 TA instruments. Taxa de

aquecimento de 10°C/min. até a temperatura de 1250°C em ambiente com nitrogênio usando ar sintético.

A distribuição de tamanho de partículas foi determinada para o cimento, lama vermelha, argila de descarte e carbonato de cálcio. Utilizou-se equipamento CILAS 1064. As densidades das partículas foram determinadas por picnometria de gás He em equipamento Ultracyc 1200 de marca Quantachrome Instruments.

### 3.3 PREPARAÇÃO DO ADITIVO SUPLEMENTAR

Preparou-se o aditivo suplementar para cimento a partir de três composições distintas. Sendo elas: 100% lama vermelha; 85% lama vermelha e 15% argila do depósito; 70% lama vermelha e 30% argila do depósito. As matérias primas foram secas e destorroadas em amofariz e pestilo de 3 L. As dosagens foram realizadas e homogeneizadas em sacos plásticos. Preparou-se 2kg de cada dosagem.

As misturas foram pré-umidificadas com 5% de umidade. Em seguida foram pelletizadas em pelletizador com diâmetro de disco de 0,6m, a 50 RPM, com ângulo 45° e tempo de aproximadamente de 8 a 10 minutos. Durante a pelletização, borrifou-se água potável para aglomeração do pó até que a mistura atingisse aproximadamente 20% de umidade. A Figura 11 mostra uma fotografia do experimento.

Os grânulos obtidos apresentaram tamanho entre 0,5 a 4 mm. Após a pelletização os grânulos foram submetidos a secagem a 110°C até massa constante.

Figura 10 - Pelotização das misturas.



Fonte: Do autor.

As misturas foram calcinadas em forno rotativo contínuo marca FortLab a temperatura de 1200°C, com inclinação de 0,5°, frequência de 11,5 Hz. O forno possui diâmetro interno de 7 cm e comprimento de 1,5m sendo que a zona quente possui 2/3 do comprimento do tubo conforme mostrado na Figura 12. Com estes parâmetros o tempo de residência de frio a frio foi de aproximadamente 78 min., sendo 52 min. de zona quente.

Figura 11 - Forno de Calcinação das misturas.



Fonte: Do autor.

Após a calcinação as misturas foram moídas em diferentes tempos de moagem para que se tivesse diferentes dados para comparação, conforme Tabela 12, em moinho planetário com capacidade de 500 ml. A carga de bolas foi de 250 g com tamanho variando de 4 a 10 mm.

Tabela 12 - Misturas x Tempo.

<i>Proporção</i>	<i>Tempo (min.)</i>	<i>Tempo (min.)</i>
<i>100% LV</i>	<i>10</i>	<i>50</i>
<i>70%LV+30%AD</i>	<i>30</i>	<i>50</i>
<i>85%LV+15%AD</i>	<i>-</i>	<i>50</i>

Fonte: Do autor.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS

Os corpos de prova foram caracterizados por difração de raios X, distribuição de tamanho de partículas e picnometria de He conforme descrito anteriormente.

#### 3.4.1 Alcalinidade Disponível

Para determinar o teor de álcalis disponíveis foram seguidas as recomendações da norma (NM 25:2002). O teste de alcalinidade foi realizado para medir o teor de álcalis presente nas diferentes misturas. Para isso uma mistura de 2,5 partes do pó de LV e 1 parte de CaOH são misturados em 10cm<sup>3</sup> de água e mantidos em estufa a 38±4°C por 28 dias. Após esse período o material é lavado e filtrado para coletar os álcalis que se solubilizaram por troca catiônica com o CaOH. A determinação quantitativa é realizada por análises de absorção atômica para sódio e potássio, foram realizadas no equipamento marca VARIAM modelo AA 240FS, segundo a norma SMEWW 3110.

#### 3.4.2 Índice de Atividade Pozolânica

O índice de atividade pozolânica também foi determinado de acordo com a norma NBR 5752-1992. Os corpos de provas de argamassa foram produzidos conforme norma NBR - 5739-2003 com substituição de 1/3 do volume de cimento pelas misturas calcinadas e substituiu-se também carbonato de cálcio com o objetivo de estudar esse aditivo como filler (preenchimento de volume), adicionando-se 390g de cada areia, utilizando e cimento comercial (CPV- ARI).

As misturas, mostradas na Tabela 12, foram preparadas em argamassadeira EMIC AG-5 NO6168 NS448.

Para avaliação da consistência das argamassas realizou-se o teste de flow-table. Determinou-se os diâmetros finais de cada traço. O teor de água foi ajustado para que o diâmetro ficasse entre o intervalo de 21 a 23 cm, de acordo com a norma.

Confeccionou-se corpos de prova em moldes de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, sendo 5 corpos de prova por mistura, totalizando 45 corpos de prova. A cura ocorreu durante 28 dias em estufa a 38°C com os corpos-de-prova dentro de sacos plásticos para não perderem umidade conforme Figura 13. A resistência à compressão foi executada de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 13279 (1995) - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e

tetos - Determinação da resistência à compressão. Para tanto se utilizou uma máquina de ensaio universal modelo EMIC DL 30000, com deslocamento de 1 mm/min. até a ruptura do corpo de prova.

Figura 12 - Corpos de prova.



Fonte: Do autor.

### 3.4.3 Caracterização Micro-estrutural

A microestrutura foi caracterizada com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), equipamento marca ZEISS, EVO MA 10. Os corpos de prova depois de rompidos foram cortados para obtenção da seção transversal, embutidos e polidos com auxílio de uma politriz com pasta abrasiva em alumina com tamanho de 1  $\mu\text{m}$ . As imagens obtidas da seção transversal corresponde a parte do miolo dos corpos-de-prova.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Tabela 13 mostra as composições químicas das matérias primas. Observa-se que a LV apresenta elevado percentual de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e conforme previsto em literatura apresenta elevado percentual de  $\text{Na}_2\text{O}$ , que prejudica a argamassa. A composição apresentada é tipicamente a reportada por outros autores (RIBEIRO, 2011; SANTOS, 2006).

A argila de descarte apresentou elevado teor de alumina (27,97%), o que indica ser composta por parcela significativa de argilominerais. O teor de sílica e a perda ao fogo indicam a mesma característica.

Com esta composição a LV calcinada pura ou em mistura com a argila não terá problemas em atender aos teores mínimos de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  necessários para um material ser considerado uma pozolana. Este índice deve ser superior a 70% (NBR 12653/1992) para materiais das Classes N e C.

O cimento CPV ARI utilizado neste estudo apresenta um teor de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) de 58,25%. A composição está de acordo como informado pelo fabricante, sendo que o mesmo apresenta percentual médio de 60%  $\pm 2$ , dependendo do lote de fabricação, mês, ano.

O valor de perda ao fogo de 3,56% sugere a presença de filler calcário.

Tabela 13 - Composições químicas das matérias primas.

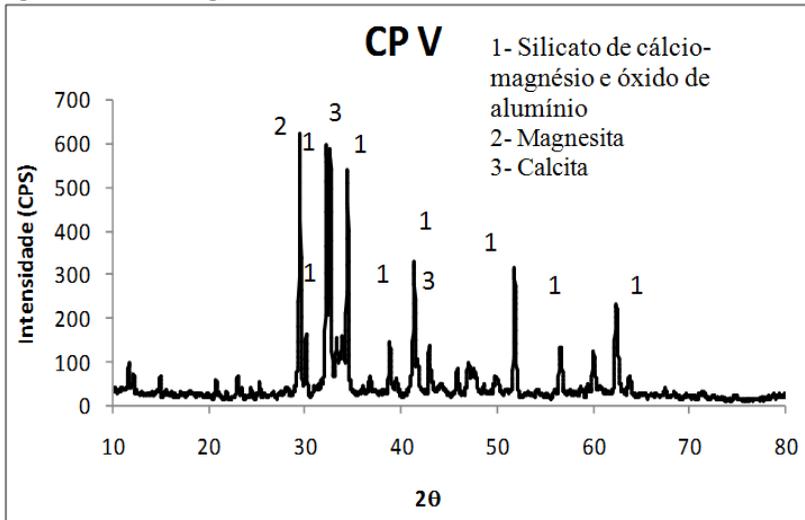
Elementos	CP V	LV	AD
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,86	25,51	27,97
$\text{CaO}$	59,48	1,76	<0,05
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,70	26,91	2,86
$\text{K}_2\text{O}$	0,98	<0,05	<0,05
$\text{MgO}$	4,23	<0,05	<0,05
$\text{Na}_2\text{O}$	0,22	12,33	<0,05
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,28	0,09	<0,05
$\text{SiO}_2$	21,59	19,46	55,56
$\text{TiO}_2$	0,80	4,90	2,83
Perda ao Fogo	3,86	8,94	10,53

Fonte: Do autor.

## 4.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

O cimento CPV-ARI utilizado no experimento apresentou 3 fases cristalinas: silicato de cálcio-magnésio e óxido de alumínio, magnesita e calcita conforme Figura 14. A identificação de calcita confirma a presença de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), calcário, na mistura. De acordo com a composição estequiométrica o teor estimado de calcário é de 8% conforme informado pelo fabricante (ITAMBÉ, 2014).

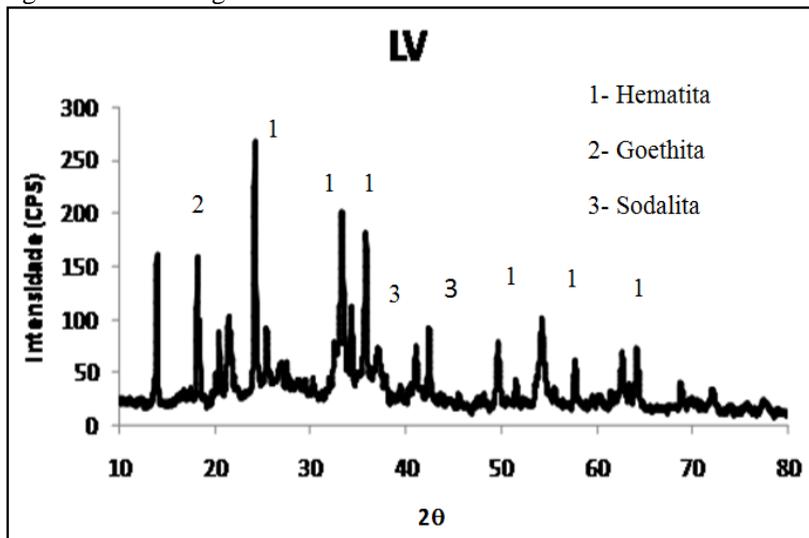
Figura 13 - Difratograma do Cimento CP-V ARI.



Fonte: Do autor.

A lama vermelha, quando natural, apresentou 3 fases cristalinas distintas: Hematita, Goethita e Sodalita conforme Figura 15.

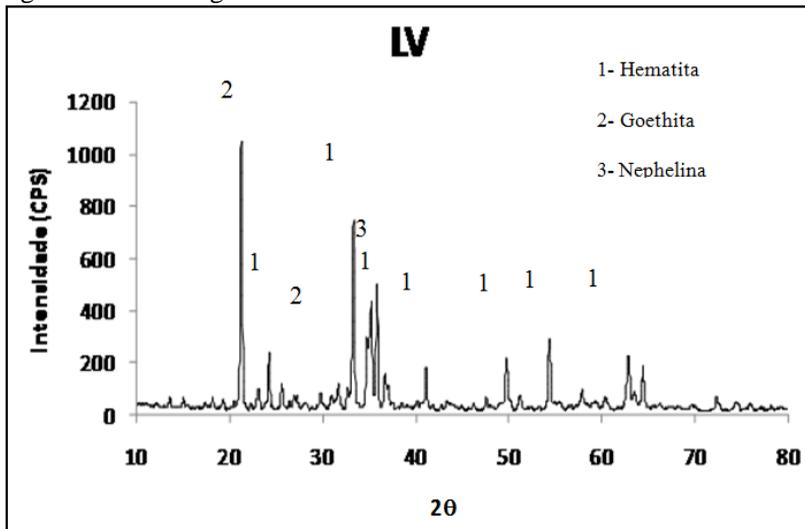
Figura 14 - Difratoograma da Lama Vermelha.



Fonte: Do autor.

Após a sua calcinação a 1200°C a lama vermelha apresentou as mesmas fases, porém houve uma diminuição das fases amorfas conforme difratograma (Figura 16).

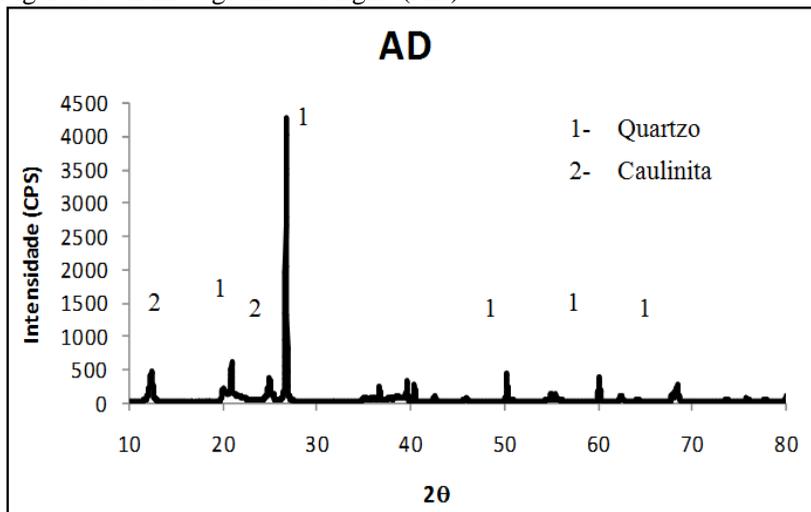
Figura 15 - Difratoograma da Lama Vermelha Calcificada.



Fonte: Do autor.

A argila de descarte apresentou quartzo como constituinte (Figura 17). A fração argilomineral apresenta-se com elevado grau de amorfização. A formação observada entre 20 e 25°C é semelhante a observada em caulinitas amorfizadas (BECKER.E, 2014) (BATISTA, A. P, 2009). De acordo com a análise racional é esperado que a argila contenha aproximadamente 71% de caulinita, 22% de quartzo, 3% de hematita e 3% de rutilo ou anatase.

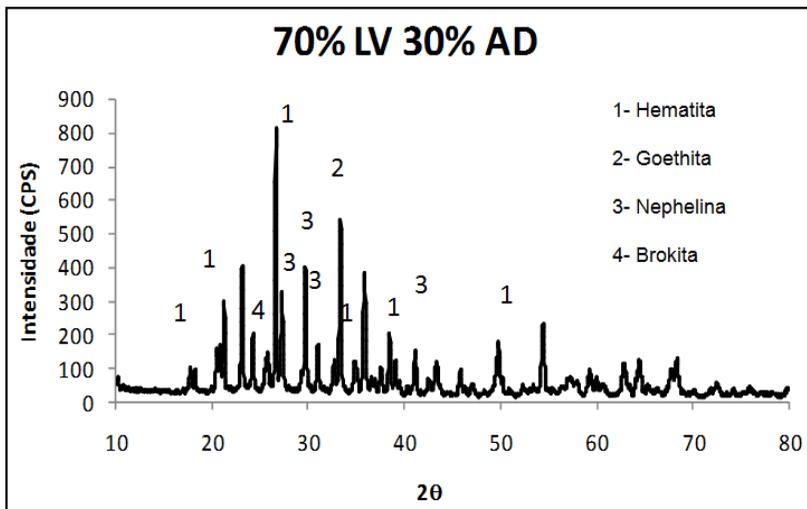
Figura 16 - Difratoograma da Argila (AD).



Fonte: Do autor.

Após ser calcinada a lama vermelha com percentual de 70% LV e 30% AD apresentou 4 fases cristalinas: Quartzo, Hematita, Nephelina e Brokita, conforme mostra a Figura 18.

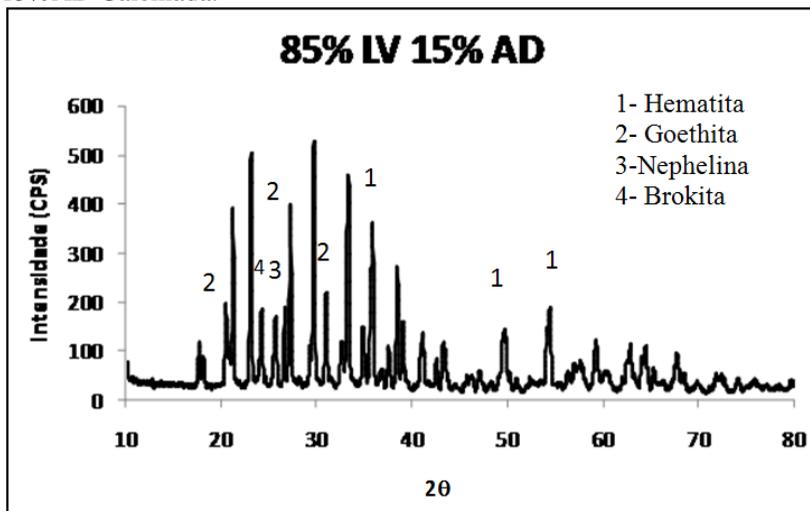
Figura 17 - Difratoograma da Lama Vermelha Calcinada 70% LV 30% AD Calcinada.



Fonte: Do autor.

Quando misturado em percentual 85% LV e 15% AD 50min apresenta as mesmas fases, porém com surgimento da brokita, devido a ocorrência da bauxita conforme mostra a Figura 19.

Figura 18 - Difratoograma da Lama Vermelha Calcinada 85%LV 15%AD Calcinada.

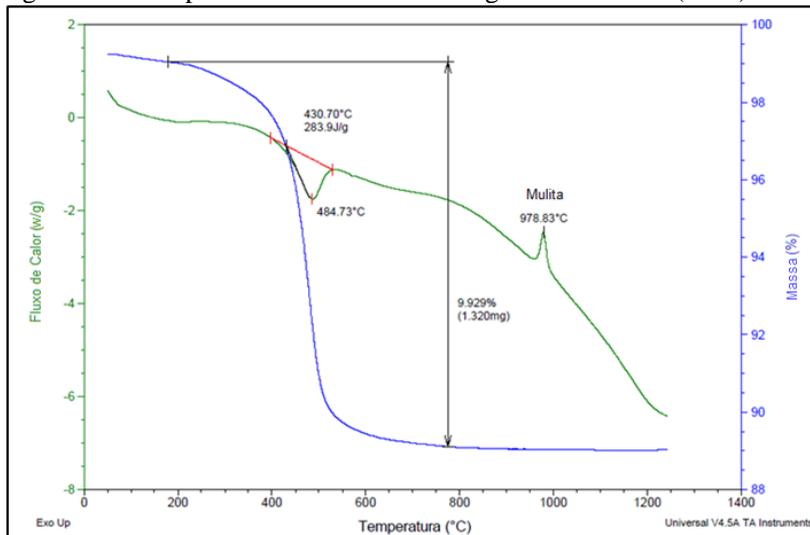


Fonte: Do autor.

#### 4.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO

O comportamento térmico da argila é mostrado na Figura 20. A perda de massa que ocorre entre 200 e 600°C, e consequente pico endotérmico, típico de reação de desidroxilação de argilomineral, referente a caulinita. O pico exotérmico a 978°C corresponde a nucleação de mulita. Este resultado comprova a existência de argilomineral nesta matéria-prima. Apresentando pequeno pico na temperatura de 560°C devido a presença de quartzo (RIVAS, 2010), (MENEZES, 2008). A análise térmica foi realizada por DSC-TGA.

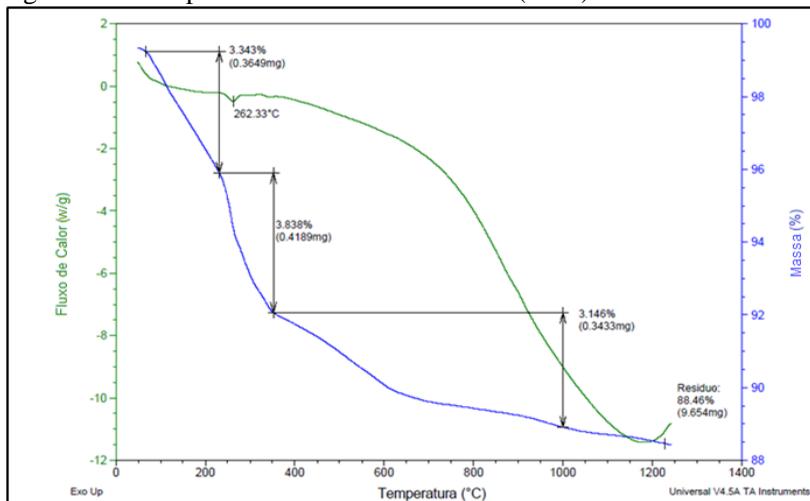
Figura 19 - Comportamento Térmico da Argila de Descarte-(DSC).



Fonte: Do autor.

Na Figura 21 analisa-se o comportamento térmico da LV onde se pode observar 3 faixas de perda de massa significantes, ocorrendo entre 50-225°C uma perda de massa de 3,34%, uma nova perda entre 225-350°C de 3,83%, sendo que na temperatura de 1000°C ocorreu uma perda de 3,146%, totalizando uma perda de massa de 10,32%, apresentando um pico endotérmico a 262°C referente a decomposição da gibsita e água adsorvida. A perda de massa na faixa de 225-330°C esta associada a decomposição da goethita com formação de hematita. Apartir de 800°C a perda de massa pode estar associada à perda de espécies voláteis retidas no interior da estrutura (RIVAS, 2010). A análise térmica foi realizada por DSC-TGA.

Figura 20 - Comportamento Térmico da LV - (DSC).

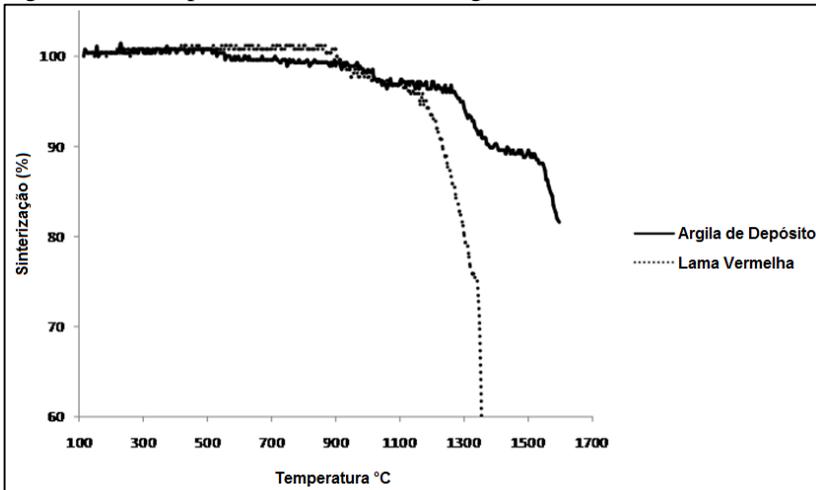


Fonte: Do autor.

#### 4.4 DILATOMETRIA ÓPTICA

A Figura 22 mostra os resultados obtidos do ensaio de dilatometria óptica da LV e AD. Esta análise revela aspectos muito importantes do comportamento térmico do material através do registro gráfico da variação das dimensões da amostra em função da temperatura. Nota-se que a LV apresenta uma leve expansão de 0,5% até alcançar o patamar de temperatura de 850°C em função da dilatação térmica. Entre 850 e 900°C a amostra apresenta uma retração devido à cristalização de nefelina. Por volta de 1200°C o material apresenta início de sinterização. No caso da argila, ela apresenta uma região de retração entre 900 e 1000°C em função da nucleação da mulita. Foi observado ainda que o início da sinterização ocorre por volta de 1300°C, sendo portanto, material mais refratário do que a LV devido a presença de caulinita e quartzo.

Figura 21 - Comportamento térmico da argila de descarte- Dilatométria.



Fonte: Do autor.

#### 4.5 DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DE PARTICULAS

A Tabela 14 mostra os resultados de distribuição do tamanho de partícula. Para os materiais calcinados, para o cimento Portland e para o calcário. O cimento apresentou tamanho mediano de  $8,7\mu\text{m}$ , valor esperado conforme cimento ITAMBE (2014). A LV 100% com tempo de moagem de 10 e 50min apresentou um diâmetro mediano de  $6,4$  e  $4,0\mu\text{m}$ . Sendo este aditivo mais fino do que o cimento também é esperado algum efeito positivo em termos de melhorias no empacotamento de partículas. Quanto maior o tempo de moagem menor o tamanho de partícula. A mistura 70%LV+30%AD apresentou tamanho de  $12,9$  e  $5,4\mu\text{m}$ , respectivamente para 30 e 50min de tempo de moagem. Da mesma forma é esperado efeito positivo sobre o empacotamento de partículas. Quanto ao tamanho de partícula do  $\text{CaCO}_3$  tal como recebido apresentou tamanho mediano de  $16\mu\text{m}$ , bastante superior ao do cimento e aos demais aditivos. Por esta razão efetuou-se uma moagem adicional de 20 min. O resultado foi a obtenção de um carbonato com tamanho mediano de  $7,3\mu\text{m}$ . Com este cenário dispõem-se de aditivos suplementares com faixa de tamanho de partícula que permite uma comparação mais apropriada sobre eventuais ganhos de resistência por efeito *filler*.

Tabela 14 - Granulometria das misturas.

Proporção	Tempo moagem (min.)	Tamanho a 10% ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho a 50% ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho a 90% ( $\mu\text{m}$ )
CP V	-	1,0	8,7	22,2
100% LV	10	1,1	6,6	21,7
100% LV	50	0,8	4,0	11,8
70%LV+30%AD	30	0,4	12,9	44,0
70%LV+30%AD	50	0,8	5,4	25,6
CaCO <sub>3</sub>	-	2,1	16,4	43,4
CaCO <sub>3</sub>	20	1,7	7,3	23,3

Fonte: Do autor.

#### 4.6 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

Os valores da Tabela 16 ao comparar a resistência de compressão média dos corpos do cimento CP V- ARI com as demais misturas mostram que o mesmo apresentou maior resistência que as demais misturas, tal como esperado. Constata-se ao analisar os corpos de prova de 100% LV com diferentes tempos de moagem (10 e 50 min) a importância da granulometria para o empacotamento, sendo que os corpos de prova com maior tempo de moagem apresentam maior resistência a compressão devido a granulometria das partículas. A água de amassamento utilizada foi na relação de 1:0,55.

A adição da argila na relação 70%LV+30%AD (30 min) quando comparada a mistura 70%LV+30%AD (50 min) apresentou um leve aumento da resistência quando moída em tempos diferentes podendo assim considerar que o tempo de moagem desta mistura não interfere tanto na resistência cerca de 2%.

Analisando os resultados da tabela tem-se que os índices de atividade pozolânica com cimento variam de 80% a 88%. Os resultados indicam certa tendência de redução do valor de índice de atividade pozolânica com a presença de argila em composição com a lama vermelha.

Observa-se na Tabela 15 que o IAP da LV apresenta valores superiores aos da norma. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992c),

materiais com índice superior a 75% como o cimento podem ser considerados pozolânicos.

Os resultados para o IAP das pozolanas produzidas poderiam ser ainda melhores caso o cimento de referência não tivesse 8% de calcário em mistura.

Como pode ser observado nos resultados comparativos do calcário, por não se tratar de material pozolânico os resultados não superaram os valores estabelecidos por norma. Para o calcário moído, ou seja, com tamanho médio de partícula na mesma magnitude dos aditivos produzidos, o IAP é ainda menor, o que contribui para destacar os resultados por efeito pozolânico da lama vermelha, não apenas por efeito filler.

Tabela 15 - Granulometria das misturas.

Proporção	Tempo moagem (min)	Resistência a compressão (MPa)	IAP
100% LV	10	24,4	65%
100% LV	50	33,3	88%
85%LV+15%AD	50	32,2	85%
70%LV+30%AD	30	31,2	83%
70%LV+30%AD	50	30,7	80%
CP V- ARI	-	37,8	100%
CaCO <sub>3</sub>	-	26,9	71%
CaCO <sub>3</sub>	20	22,4	59%

Fonte: Do autor.

#### 4.7 ALCALINIDADE

A LV devido ao seu elevado pH é considerada um resíduo não inerte e algumas patologias estão associadas ao seu uso quando adicionado ao concreto e argamassa, devido à elevada concentração de íons alcalinos (principalmente o sódio), favorecendo as reações álcali-agregado. A LV quando utilizada como adição cimentícia, requer um cuidado especial por apresentar um elevado teor de álcalis. A literatura mostra que a reação álcali-agregado é prejudicial à estrutura do concreto. Alguns pesquisadores (LABRINCHA, 2012; RIBEIRO, 2011), já demonstraram que entre as alternativas para reduzir a reação álcalis-sílica está a adição de materiais pozolânicos ativos.

A Tabela 16 apresenta a concentração de sódio, potássio e o teor de alcalinidade disponível em termos de teor equivalente de Na<sub>2</sub>O.

Observa-se que no caso do  $\text{CaCO}_3$ , o mesmo não apresenta alcalinidade significativa. O cimento Portland apresentou 0,66 por cento de alcalinidade, que está dentro dos limites aceitos pela norma NM- 25-2002.

Com relação ao teor de álcalis disponível na LV, observa-se que a mesma sem adição de argila apresenta teor muito elevado, que impossibilita seu uso em aplicações estruturais (Tabela 16).

Observa-se também que quanto mais fina as partículas, maior foi o teor de álcalis disponível. Com a adição de 15% de argila em composição com a LV a alcalinidade disponível cai de 6,6 para 2,6 por cento, porém a mesma não pode ser utilizada por apresentar alcalinidade superior a permitida pela norma NM- 25- 2002. A presença de sílica e alumina na argila favorece a reação com o sódio, tornando-o menos disponível (menos vulnerável à troca catiônica no ensaio). Com a incorporação de 30% de argila o teor de álcalis disponível reduziu para 1,2 por cento, estando dentro do estabelecido pela norma (<1,5%) NM-25- 2002.

Tabela 16 - Resultados de Alcalinidade Disponível para os Materiais Estudados.

Material	Tempo moagem (min)	Concentração K ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	Concentração Na ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	Alcalinidade disponível (Percentual)
100% LV	10	0,31	32,04	4,30
100% LV	50	0,26	49,27	6,62
85% LV+15% A D	50	0,54	19,6	2,64
70% LV+30% A D	30	0,64	13,50	1,83
70% LV+30% A D	50	0,37	9,11	1,21
CP V	-	5,18	2,19	0,66
$\text{CaCO}_3$	-	0,41	0,04	0,01
$\text{CaCO}_3$	20	0,55	0,25	0,04

Fonte: Do autor.

#### 4.8 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

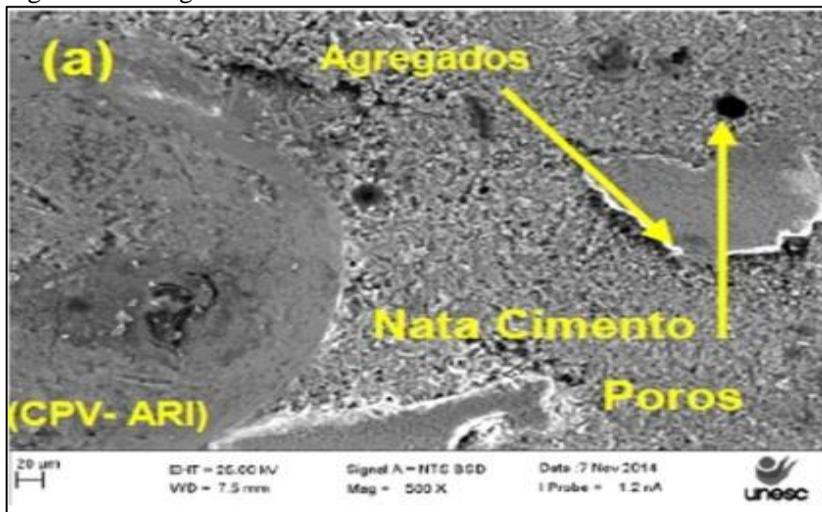
As amostras foram analisadas em 2 faixas de ampliação, 500x e 3000x. Na faixa de ampliação de 500x (Figura 23) observa-se a nata de cimento, os agregados (grãos de areia) e porosidade.

Na faixa de ampliação de 3000x observa-se apenas a nata de cimento. A amostra do cimento CPV - ARI da (Figura 24 e Figura 25) apresenta uma pasta de cimento bem homogênea envolvendo todos os grãos. Enquanto que na amostra da LV 100% (Figura 23-[G] e [H]) ampliada a 500x observa-se uma textura mais granulada, pela presença das partículas do material pozolânico.

A mesma textura granulada também é observada nas pozolanas contendo 85% e 70% de lama vermelha. Comparando a região da nata de cimento das amostras com adição de pozolana, observa-se que para o caso da pozolana 100% lama vermelha, existem partículas dispersas com um forte contraste mais claro. Este contraste é devido a presença de óxido de ferro, elemento de elevado peso molecular. Uma análise química pontual relevou se tratar de partículas ricas em ferro, provavelmente uma forma mais reduzida do que a hematita. A incidência destas partículas nas pozolanas com adição de argila na composição é menos acentuada.

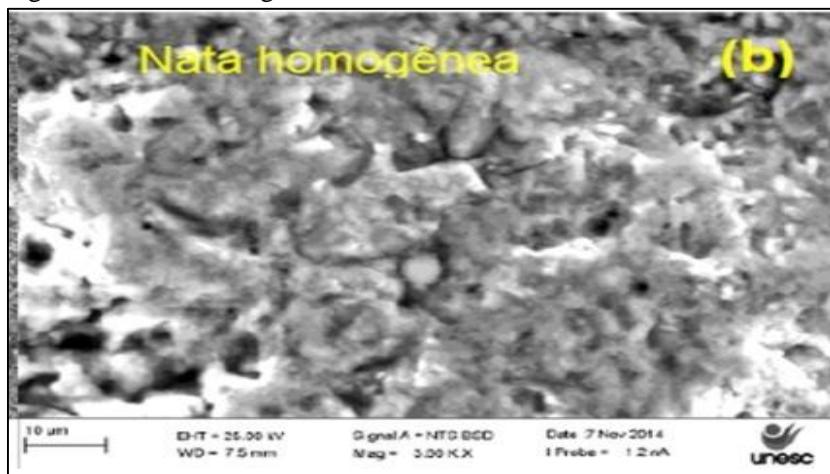
A micrografia da composição contendo calcário revela uma textura intermediária entre o traço padrão e aquele com adição pozolânica.

Figura 22 - Imagens amostra – MEV.



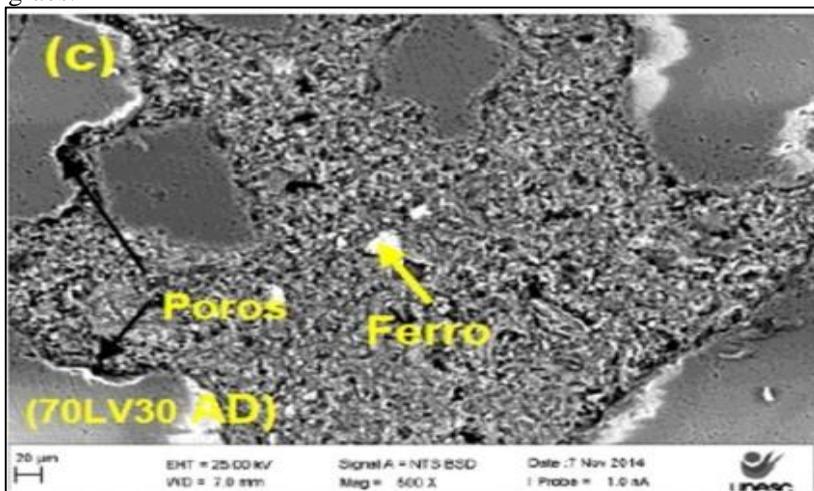
Fonte: Do autor.

Figura 23 - Nata homogênea.



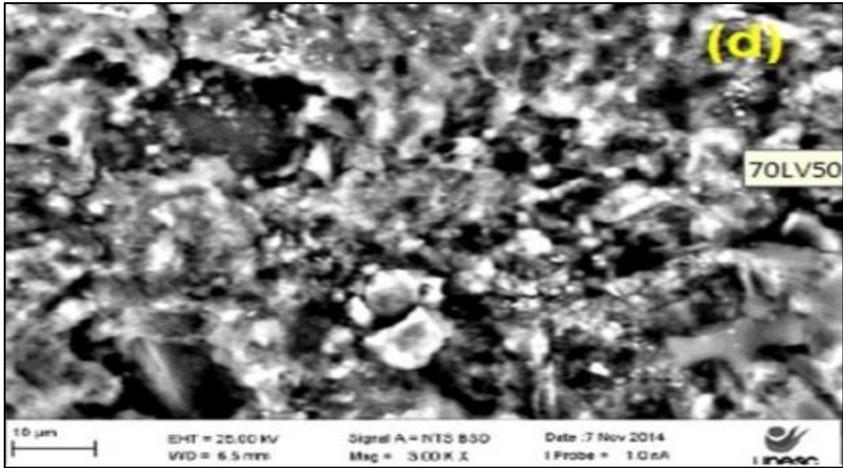
Fonte: Do autor.

Figura 24 - Pasta de cimento bem homogênea envolvendo todos os grãos.



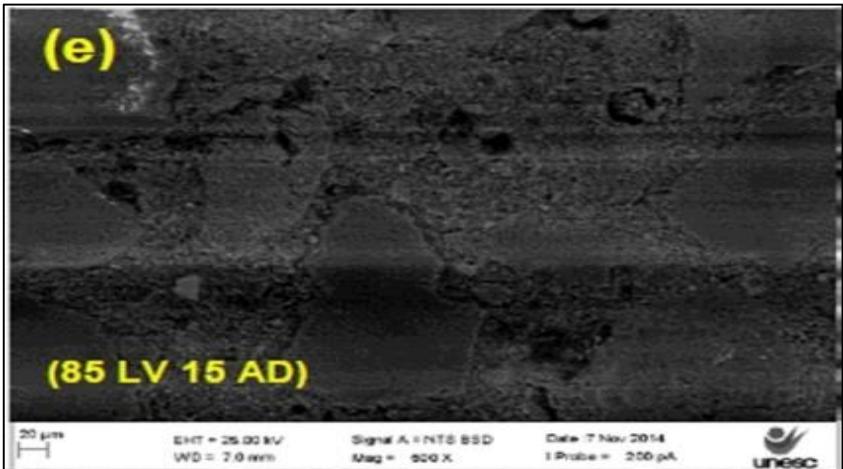
Fonte: Do autor.

Figura 25 - D.



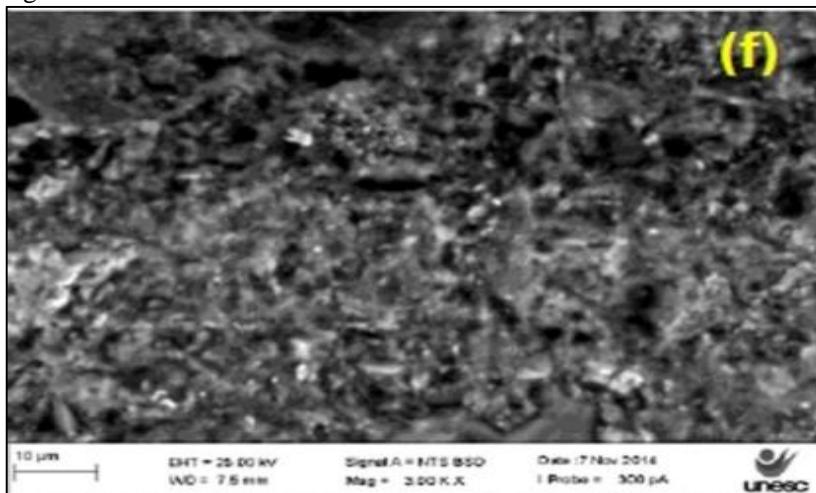
Fonte: Do autor.

Figura 26 - E.



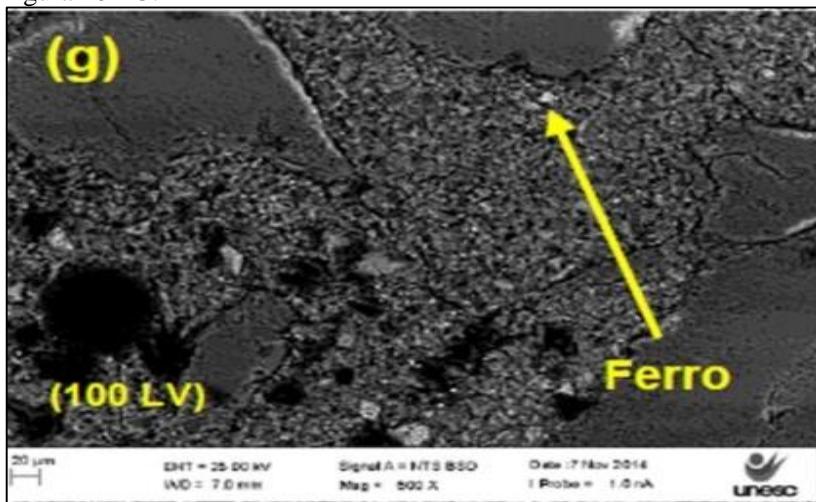
Fonte: Do autor.

Figura 27 - F.



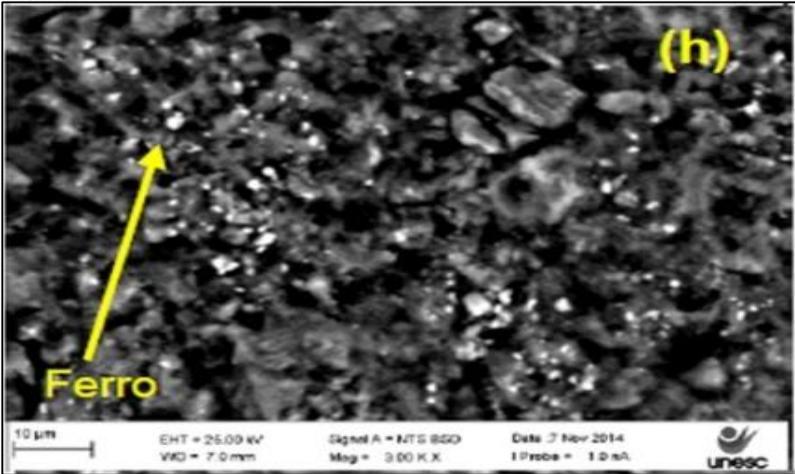
Fonte: Do autor.

Figura 28 - G.



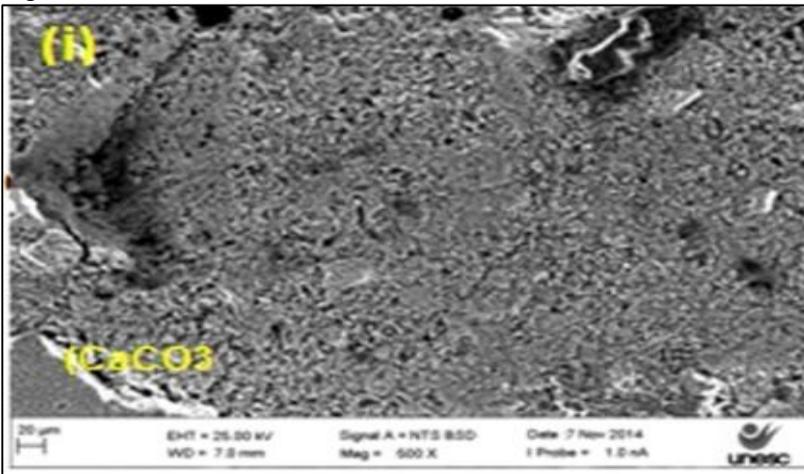
Fonte: Do autor.

Figura 29 - H.



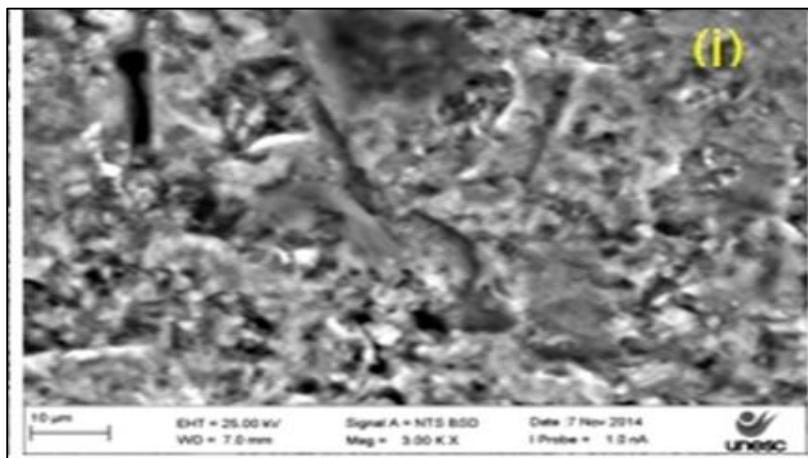
Fonte: Do autor.

Figura 30 - I.



Fonte: Do autor.

Figura 31 - J.



Fonte: Do autor.

A Tabela 17 mostra a composição elementar em proporção mássica, semi-quantitativa, obtida por sonda EDS, na região da nata de cimento. Observa-se que o teor de cálcio nos traços de referência e com adição de  $\text{CaCO}_3$  são semelhantes e maiores do que os demais traços, pois o teor de  $\text{CaO}$  no material é inferior a 1,5%.

Quanto ao teor de Na observa-se que a maior concentração ocorre nos traços com adição pozolânica. A concentração diminui à medida que aumentou o teor de argila na mistura. Este resultado também é compatível, de certo modo, com a alcalinidade disponível. Aparentemente o Na para a LV100 está mais exposto na superfície do que para a composição com maior teor de argila. O teor de ferro (Fe) também se apresentou como sendo maior nos traços com adição pozolânica, devido ao elevado teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na LV.

O teor de alumínio também diminui a medida que aumenta o teor de argila na composição da pozolana. Aparentemente o Fe para a LV100 está mais exposto na superfície do que para a composição com maior teor de argila.

Tabela 17 - Composição elementar mássica, semi-quantitativa obtida por sonda EDS na região da nata do cimento dos traços estudados.

	<b>Referência</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>100LV50</b>	<b>85LV50</b>	<b>70LV50</b>
Ca	47	50	27	30	39
Na	0,5	0,5	7	5	2
Si	7	6	9	11	12
Fe	3	1	10	4	3
Al	2	2	10	8	4
Outros	40,5	40,5	37	42	50

Fonte: Do autor.

## 5 CONCLUSÃO

Após a análise das misturas de argamassa (traços) conclui-se que para uso como material suplementar ao cimento, com alcalinidade de acordo com o exigido pela norma, a mistura 70%LV+30%AD, calcinada a 1200°C com 52 minutos de tempo de residência e tamanho médio de partícula de 25,6µm. O valor obtido de alcalinidade disponível foi de 1,2% e o índice de atividade pozolânica foi de 80%. Dessa forma é apropriado ao uso em aplicações estruturais. A lama vermelha empregada no trabalho possui composição típica, principalmente em termos de teor de óxido de sódio. Com este resultado pode-se esperar que em condições semelhantes de mistura com argila e condições de processamento possam ser obtidos resultados semelhantes para a maioria das lamas vermelhas disponíveis. Quanto à argila que foi utilizada na mistura, ela contém teor de alumina de 27,97%, sendo predominantemente constituída por caulinita, aproximadamente 71% e quartzo aproximadamente 22%. A calcinação em forno rotativo demonstrou ser adequada a produção deste tipo de produto em regime contínuo. Trata-se de uma tecnologia normalmente empregada para fabricação de cimento Portland e pozolanas sintéticas. Dessa forma, o conceito de processo é amplamente dominado. O grau de moagem tem efeito decisivo sobre a alcalinidade disponível e atividade pozolânica. Em geral, quanto maior o grau de moagem maior a alcalinidade disponível e maior a atividade pozolânica. Por serem propriedades antagônicas e igualmente importantes deve-se chegar a um ponto ótimo.

No caso da mistura 70%LV+30%AD, por ter característica pozolânica, apresenta redução da permeabilidade e conseqüentemente melhora na durabilidade da argamassa. Quanto ao teor de sódio das misturas, observa-se que o tempo de moagem tem influência na sua alteração, quanto maior o tempo menor o teor de sódio. Na comparação realizada com adição de *filler* calcário, cujo efeito químico sobre a resistência mecânica não influencia, restando apenas efeito mecânico de empacotamento de partícula. Ao comparar com a LV, em similaridade de distribuição de tamanho de partícula, observa-se que a resistência mecânica é maior. Isso significa que a LV, além do efeito de empacotamento de partícula ainda possui certa atividade pozolânica.

Os resultados obtidos do índice de atividade pozolânica sugerem que tenha reatividade com a portlandita.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo para mudança da coloração da mistura de lama vermelha, mais argila para uso em argamassa;
- Influência do aumento da temperatura e do percentual de mistura da lama vermelha mais argila superior a 30%;
- Influência da adição de lama vermelha e argila na corrosão do concreto armado.

## REFERÊNCIAS

ABAL. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: 12 jun. 2014.

ABAL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório de Sustentabilidade da indústria do alumínio**. Disponível em: <<http://WWW.abal.org.br/>>. Acesso em: 28 jul. 2014.

ABAL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. Associação Brasileira do Alumínio (ABAL). São Paulo, 2007.

ABCP - **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO ORTLAND – 2002**.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653/92**. Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739-2003**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto - Método de ensaio.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004/04**. Classificação de Resíduos Sólidos – Especificações. Rio de Janeiro, 2004.

ALCOA. **Alumínio S.A.** Disponível em: <<http://www.alcoa.com/brazil/pt/home.asp>>. Acesso em: 19 ago. 2014.

ALUNORTE. **Alumina do norte do Brasil S/A**. Disponível em: <<http://www.alunorte.net>>. Acesso em: 12 jun. 2014.

ANJOS, F. V; SILVA, J. B. (1983). As usinas de produção de alumínio da ALCAN no Brasil – processo Bayer para produção de alumina e os processos eletrolíticos para a produção de alumínio. In: **As usinas brasileiras de metalurgia extrativa dos metais não-ferrosos**, ABM, São Paulo.

ANTONIASSI, J. L. **A Difração de Raios - X com o método de Rietveld aplicada a bauxita do Porto de Trombetas – PA**.

Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 129p. São Paulo, 2010.

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T.; NAVARRO, G. R. B. Caracterização da lama vermelha brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras aplicações. In: **International workshop advances in cleaner production**. 3 ed. São Paulo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ASTM International Standards. **C 125 – 03: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. United States.

BATISTA, A. P. et al. Caracterização de argilas bentoníticas de Cubati-PB. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.4, n. 3, 2009.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos S.A., 1979.

BECKER, E. **Utilização de Caulim Ativado em Substituição a Argila Ball Clay em Engobe de Revestimento Cerâmico** - 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense.

COSTA, C. G. et al. Valorização do rejeito proveniente do beneficiamento de caulim do município de Equador-RN. In: **Asociación Internamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. Sección Uruguay, 2006

CROSSLEY P. Bauxite. **Industrial Minerals**. 2001.

DIAS, S. L. **Incorporação de Resíduos de Caulim em Argamassas de Assentamento e Revestimento para Uso em Construção Civil – Avaliação da Atividade Pozolânica**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais)- Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2010.

DNP. **Balanco Mineral**. 1984.

**EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION.** Disponível em:  
<<http://www.eaa.net/>>. Acesso em: 09 ago. 2013.

FALÇÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção.** Vol.1. 5ª Edição Revisada. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2005.

FARIAS FILHO, J. 2007. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito.** Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Tese de Doutorado.

FEITOSA, A. **Influência da adição de pozolana em concretos moldados na região de Caruaru, 2010** – Pernambuco – Brasil. Disponível em:  
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABcdcAK/influencia-adicao-pozolana-concretos-moldados-na-regiao-caruaru-pernambuco>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

FIGUEIREDO, B.R. 2000. **Minérios e Ambiente.** Unicamp, Campinas.

GEREMIAS, Márcio Luiz. **Caracterização das argilas da bacia do Paraná, no sul de Santa Catarina, para uso na fabricação de pisos cerâmicos.** 2003. 225 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GÓIS, C. C.; LIMA, R. M. F.; MELO, A. C. Sedimentação de resíduo Bayer utilizando flocculantes hidroxamatos e poliacrilamida. **Revista Escola de Minas.** V. 56, n.2, Ouro Preto, Minas Gerais, Abril/Junho, 2003.

GOUVEIA, F. P. **A Utilização da Lama Vermelha (LV) Como Matéria-Prima Para Produção de Blocos Cerâmicos Estruturais Destinados a Indústria da Construção Civil.** Belém, 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: IV old obstacles and new pathways for in situ residue bioremediation. **Ydrometallurgy.** Amsterdam, v. 108, n. 1/2, 2011.

GRIM, R. E. 1968. **Clay Mineralogy**: International Series in the earth and Planetary Sciences. Second Edition, MacGraw-Hill Book Company. New York. Disponível em: <<https://acta.inpa.gov.br/fasciculos/29-2/PDF/v29n2a08.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

HILDEBRANDO, E. A.; SOUZA, J.A.S; NEVES, R.F. Influência do tipo de argila nas propriedades físico-mecânicas de corpos cerâmicos obtidos com lama vermelha do processo Bayer. In: **CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 17, 2006, Foz do Iguaçu.

HIND, Andrew R et al. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces**. V.146, 1999.

IAI. **International Aluminium Institute**. 2008. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/>>. Acesso em: 28 maio 2014.

ISAIA, G.C. **Efeitos de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de elevado Desempenho**: Um Estudo de Durabilidade com Vistas à corrosão de Armaduras. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ISAIA; G. C.(b). **Efeitos de Altos Teores de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho sob a Ação de Cloretos** - Escola Politécnica da USP. São Paulo- SP, 1995.

ITAMBÉ. **Grupo Itambé**: o valor em ter você. Disponível em: <<http://www.portalitambe.com.br/>>. Acesso em: 28 maio 2014.

KURDOWSKI, W; SORRENTINO, F. Red mud and phosphogypsum and their fields of application. In CHANDRA, S. **Waste materials used in concrete manufacturing**. New Jersey: Noyes Publications, 1997.

LABRINCHA . The future of construction materials research and the seventh. IN **Millennium Development Goal**: A few insights. 2012

LIBERATO, C. C. et al. Impacto das Características Físicas de Lama Vermelha nas Propriedades de Pastas Cimentícias. In: **Simpósio Internacional De Iniciação Científica Da Universidade De São Paulo**, 17. São Carlos, 2009. **Anais...** São Paulo: USP, 2009.

LIMA, F. S. S. **Utilização da Lama Vermelha e do Resíduo Caulínico na Produção de Pigmento Pozolânico para Argamassas e Concretos de Cimento Portland**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

MANFROI, Eliz Paula. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. 2009. 152. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Área de concentração: construção civil. Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis.

MARTINES, R. A. C. **Economia Mineral do Brasil**, 2009.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MENEZES, R. R. 2008. Caracterização de argilas bentoníticas do Município de Sussego, Paraíba, Brasil. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.3.2.

MINATTO, F. D. et al. Desenvolvimento de agregado fino para cimento Portland a partir de lama vermelha. In: **58º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Bento Gonçalves – RS, 2014.

MISRA, V. N; RATH, P.C PARANGURU, R.K. Trends in red mud utilization. **Mineral Processing & Extractive Metal**. V. 26, 2007.

MONTANHEIRO, T. J; YAMAMOTO, J. K; KIHARA, Y. Características e Propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da serra de Itaqueri, sp. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, 2002.

MONTINI, M. Aplicações do resíduo de bauxita e da cinza pesada da indústria do alumínio na fabricação de cimento portland. IN: **Congress brasileiro de ceramic**. 53, 2009, Guarujá, SP.

NBR 5752 - **Materiais pozolânicos** – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento. Rio de Janeiro, 1992.

**NBR NM 25: 2002 - Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis.**

**NBR 13279 (1995) - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão - Método de ensaio.**

NETTO, R.M. **Tecnologia e Produtividade das Construções**. 2006 - Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMGBelo Horizonte.

NIVELLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

NP EN 196 - 5: 2005 - Methods of testing cement – Part 5:  
**Pozzolanicity test for pozzolanic cement.**

OLIVEIRA, F. A. **Estudos dos argilominerais da formação Piranema - RJ e seu possível significado paleoclimático**. Instituto de Agronomia – Departamento de Geociências – Curso de Geologia/UFRRJ. TCC – 2008.

PACHECO-TORGAL, F. Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. **Construction and Building Materials**, Inglaterra, v.51, p.151-162, 2014. Disponível em: <<http://books.genems.com/journals/civil/2-2/Building%20Materials,%20Construction%20&%20Planning/1-s2.0-S0950061813009793-main.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2014.

PASSOS, C. G.; **Síntese e caracterização de produtos absorventes de sílica funcionalizada**. Dissertação de Mestrado em química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul- 2007

PAZ, S. P. A. **Caracterização Química, Mineralógica e Aplicações Potenciais da bentonita associada a basaltos intemperizados da Formação Mosquito, bacia do Parnaíba, sul do Maranhão**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 2010, 126 p.

[PONTIKES, Y](#); [ANGELOPOULOS, G. N.](#) Bauxite residue in cement and cementitious applications: Current status and a possible way

forward. [Resources, Conservation and Recycling](#), v.73, p.53–63, abril, 2013.

Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0921344913000062/1-s2.0-S0921344913000062-main.pdf?\\_tid=0c1c9a4a-bd09-11e4-8ad7-00000aacb35e&acdnat=1424880908\\_b7fbb109219038d5e0c27401f6fb5d4b](http://ac.els-cdn.com/S0921344913000062/1-s2.0-S0921344913000062-main.pdf?_tid=0c1c9a4a-bd09-11e4-8ad7-00000aacb35e&acdnat=1424880908_b7fbb109219038d5e0c27401f6fb5d4b)>. Acesso em: 25 jun. 2014.

RAMOS, Carlos R. **Alumínio in Balanço Mineral Brasileiro**. DNPM, Brasília, 1980. World Bank. Development Prospects Group. Novembre 2008.

RIBEIRO, D. V. **Influência da Adição da Lama Vermelha nas Propriedades e na Corrosibilidade do Concreto Armado**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos

\_\_\_\_\_. Estudo de Eventuais Patologias Associadas ao Uso da Lama Vermelha em Argamassas Colantes e de Revestimento. **Cerâmica Industrial**, v 16, n. 1, jan-fev. 2011.

\_\_\_\_\_. **Influência da Temperatura de Calcinação nas Propriedades Cimentícias do Resíduo de Bauxita**. 2011– Relatório Científico Final de Pós-doutorado, apresentado à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) em junho de 2011.

\_\_\_\_\_. **Uso potencial de lama vermelha natural como pozolana para o cimento Portland**). 2011.

RIBEIRO, D.V; MORELLI, M.R. Estudo da viabilidade da utilização do resíduo de bauxita como adição ao cimento Portland. In: **CBECiMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 18, 2008, Pernambuco.

RIBEIRO, D.V. et al. **Red Mud Recycles on Bayer Process and Its Effect On the Iron Content on Liquor: Light Metals**. 2011 MaterialsResearch. Disponível em: <http://www.tms.org/%5Cpubs%5CBooks%5CPDFs%5C09-7315-G/09-7315-G-0.pdf> - Acesso em: 10 jul. 2014.

\_\_\_\_\_. Estudo de Eventuais Patologias Associadas ao Uso da Lama Vermelha em Argamassas Colantes e de Revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 16, n. 1, jan./ fev. 2011.

\_\_\_\_\_. **Influência da Adição da Lama Vermelha nas Propriedades e na Corrosibilidade do Concreto Armado**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Uso potencial de lama vermelha natural como pozolana para o cimento Portland), 2011.

RIVAS, M.J.M et al. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**. V. 15, n. 3, pp. 445 – 460, 2010. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11081>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2 ed. São Paulo Edgard Blücher, 1989.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SENHADJI, Y. et al. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. **Powder Technology**, Suíça, v.254, p.314-323, mar., 2014. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0032591014000552/1-s2.0-S0032591014000552-main.pdf?\\_tid=6e5269c2-bd0b-11e4-bd6f-00000aab0f26&acdnat=1424881932\\_4e7cbb05f008afe45e2d402b32284adf](http://ac.els-cdn.com/S0032591014000552/1-s2.0-S0032591014000552-main.pdf?_tid=6e5269c2-bd0b-11e4-bd6f-00000aab0f26&acdnat=1424881932_4e7cbb05f008afe45e2d402b32284adf)>. Acesso em: 08 maio 2014.

SILVA FILHO, E. B et al. Degradação do corante remoção black B por reagente Fenton – utilização da lama vermelha como fonte de ferro”, In: **XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Ainda não publicado, 2006.

SILVA, F.E.B; ALVES, M.C.M; MOTA, D.M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. V. 12, n.3, p 330-336. 2007.

SILVIO FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, p. 322–338, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v12n2/v12n2a10>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

SINGH, M; UPADHAYAY, S. N; PRASAD, P. M. Preparation of iron rich cements using red mud. **Cement and Concrete Research**. V. 27, n 7, 1997.

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.

VIEIRA, T. M.; GOMES, L. M. **Estudos de Parâmetros para Utilização de Rejeito do Processo Bayer na Fabricação de Agregado Leve para a Construção Civil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). UFPA - Departamento de Engenharia Química e de Alimentos, 2006.)

VIEIRA, C. M. F.; SALES, H. F.; MONTEIRO, S. N. Efeito da adição de argila fundente íltica em cerâmica vermelha de argilas caulínicas. **Cerâmica**, São Paulo, v.50, n.315, jul./set. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v50n315/a1050315.pdf>. Acesso em: 20 out. 2014

VILLAR, Lúcio F. de S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC. Rio de Janeiro, RJ. 2002.

WANG, S.; TADÉ, H.M. Ang, M.O. Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. **Chemosphere**, v.72, n.11, p.1621–1635, ago., 2008.

WAO. **World Aluminium Organization**. 2003.