

Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas

Silva Filho¹, E. B.; Alves², M. C. M.; Da Motta³, M.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Pernambuco. Cidade Universitária, Recife, PE. CEP: 50740- 521
email: ernestofilho@yahoo.com.br

² Grupo de Resíduos Sólidos, Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Pernambuco. Cidade Universitária, Recife, PE. CEP: 50740- 521
email: tina@ufpe.br

³ Grupo de Engenharia Ambiental e da Qualidade, Departamento de Engenharia Química
Universidade Federal de Pernambuco. Cidade Universitária, Recife, PE. CEP: 50740- 521
email: mottas@ufpe.br

RESUMO

A lama vermelha, resíduo da indústria de beneficiamento do alumino, é gerada a partir do refino da bauxita para produção de alumina (Al_2O_3) através do processo Bayer. Este trabalho apresenta uma revisão de literatura sobre a produção da lama vermelha, suas características, métodos de disposição final, problemas ambientais provenientes de uma disposição inadequada e aplicações alternativas para o seu aproveitamento econômico.

Palavras chaves: Lama vermelha, processo Bayer, tailing, bauxita.

Red mud: An environmental problem in alumina industry

ABSTRACT

The red mud is a residue of the industry of aluminum mining. It is generated from the refining of bauxite for alumina production (Al_2O_3) by the Bayer process. This work presents a literature review on the production of the red mud, its characteristics, methods of final disposal, environmental problems from an inadequate disposal and alternative applications for its economic utilization.

Keywords: Red mud, Bayer process, tailing, bauxite.

1 INTRODUÇÃO

Em 1888, Karl Josef Bayer desenvolveu e patenteou o processo hoje internacionalmente conhecido como “Processo Bayer” ([Hind et al., 1999](#)). O processo Bayer representa um marco na história da metalurgia, sendo considerado, ao lado do processo de cianetação para tratamento de ouro e prata, o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna ([Habashi, 2005](#)).

O processo Bayer é utilizado para o refino da bauxita (denominada assim devido à primeira mineração comercial ter corrido no distrito de Les Baux, França) na produção de alumina (Al_2O_3). Anteriormente ao surgimento do processo Bayer, o beneficiamento da bauxita era realizado através do processo Le Chatelier, desenvolvido cerca de 30 anos antes por Louis Le Chatelier. Esse método consiste no aquecimento da bauxita com Na_2CO_3 a $1200^\circ C$, remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do $Al(OH)_3$ através da ação do CO_2 e, finalmente, o $Al(OH)_3$ formado é filtrado, seco e limpo.

O processo Le Chatelier foi substituído pelo processo Bayer, devido à drástica redução no custo de produção da Al_2O_3 que este proporcionou. O processo Bayer é utilizado até hoje praticamente sem mudanças significativas, somente com a substituição do Na_2CO_3 pelo $NaOH$ e pela utilização de pressão durante a digestão ([Hind et al., 1999](#)). A literatura não é clara em relação às datas, mas uma evolução cronológica dos métodos de produção de alumina é apresentada na Figura 1.

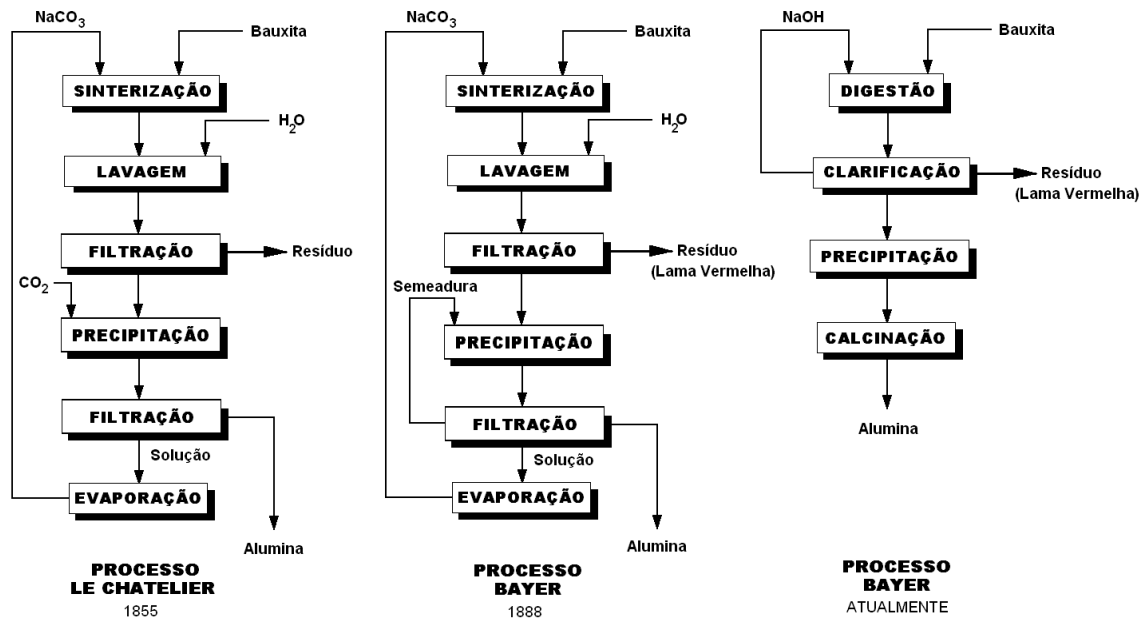


Figura 1: Evolução cronológica e esquemas dos métodos de produção de alumina (Habashi, 2005).

O processo Bayer foi originalmente desenvolvido para atender uma demanda da indústria têxtil, que utiliza o Al_2O_3 como fixador para o tingimento do algodão. Porém somente com a sua associação ao processo eletrolítico de obtenção do alumínio metálico, processo Hall-Heroult (1886), ganhou importância na metalurgia.

A literatura diverge quanto aos estágios que compõem o processo Bayer. Alguns autores preferem colocar a digestão e a clarificação em um único estágio, outros acrescentam uma etapa de classificação (Hind et al., 1999; Tan & Khoo, 2005; WAO, 2003). Entretanto, desconsiderando as peculiaridades de cada planta, a produção de alumina através do processo Bayer pode ser esquematicamente apresentada conforme a Figura 2, cujos estágios são detalhados a seguir:

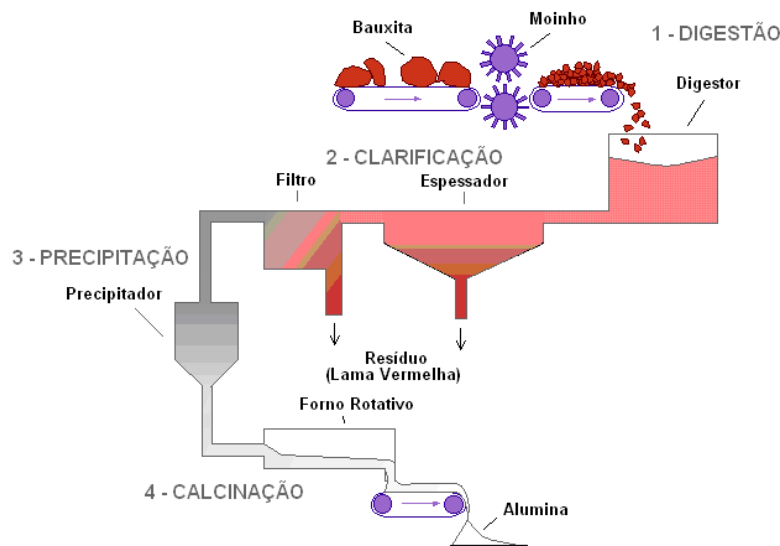
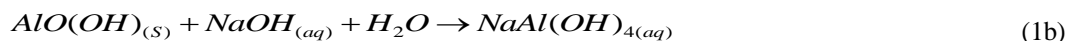


Figura 2: Fluxograma e Esquema do Processo Bayer (Adaptado de WAO, 2003).

O estágio inicial, denominado digestão, envolve num primeiro momento a moagem da bauxita, seguida pela digestão propriamente dita com uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH) sob

temperatura e pressão. As condições em que se processa a digestão (concentração, temperatura e pressão), variam de acordo com as propriedades da bauxita. Plantas modernas comumente operam em temperaturas entre 200 e 240 °C, e pressão em torno de 30 atm ([WAO, 2003](#)). Nestas condições a maioria das espécies contendo alumínio é dissolvida, formando um licor verde, Eq. (1a) e (1b).



A clarificação é uma das etapas mais importantes do processo, nela ocorre a separação entre as fases sólida (resíduo insolúvel) e líquida (licor). Normalmente as técnicas empregadas envolvem espessamento seguido de filtração. O espessamento é um processo de decantação, em que o resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores/lavadores. 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. Nesta fase é comum a adição de polímeros (como hidroxamatos e poliácridamida) para induzir a floculação das partículas nos espessadores ou até mesmo a utilização de processos de separação com membranas poliméricas (Góis et al., 2003; Hind et al., 1999; IOM3, 2005).

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; IOM3, 2005).

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](#); [IOM3, 2005](#); [ABAL, 2005](#); [WAO, 2005](#)).



O resíduo insolúvel formado durante a clarificação, chamado genericamente de lama vermelha pela indústria de refino da alumina, é composto por óxidos insolúveis de ferro, quartzo, aluminossilicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio e dióxido de titânio (geralmente presente em traços). Alguns autores, observando o processo, fazem distinção entre as partículas grosseiras (areias) e as partículas finas (lamas), devido ao fato de serem geradas em momentos diferentes durante a clarificação. Entretanto, a disposição final dos dois materiais em conjunto (codisposição) ou em separado é uma questão meramente operacional.

A lama vermelha sofre uma lavagem, através de um processo de sedimentação com fluxo de água em contracorrente e posterior deságüe para a recuperação do NaOH. As principais técnicas adotadas para o deságüe da lama vermelha serão descritas mais adiante.

Este trabalho apresenta uma revisão de literatura sobre a produção da lama vermelha, suas características, métodos de disposição final, problemas ambientais provenientes de uma disposição inadequada e alguns resultados de aplicações alternativas deste resíduo para a sua valorização econômica.

2 LAMA VERMELHA: PRODUÇÃO, DISPOSIÇÃO E APLICAÇÕES ALTERNATIVAS

A lama vermelha (red mud) é a denominação genérica para o resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação do processo Bayer, sendo normalmente disposta em lagoas projetadas especialmente para este fim, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 3: Lagoa de disposição de lama vermelha da Alumar (Ilha de São Luís - Maranhão).

A composição química da lama vermelha varia extensamente e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer em cada planta industrial. Normalmente, a lama vermelha retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica (Reese & Cundiff, 1955; McConchie et al., 2002). Adicionalmente, óxidos de V, Ga, P, Mn, Mg, Zn, Th, Cr, Nb podem estar presentes como elementos-traço (Pradhan et al., 1996). As fases minerais mais comuns são a hematita (α - Fe_2O_3), a goetita (α - FeOOH), a magnetita (Fe_3O_4), a boemita (γ - AlOOH), o quartzo (SiO_2), a sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$) e a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$?), com menor presença de calcita (CaCO_3) e gibisita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (Brunori et al., 2005; Pradhan et al., 1996; UWINONA, 2005; Yalçin et al., 2000).

A lama vermelha é constituída por partículas muito finas (cerca de 95 % < 44 μm , i.e. 325 mesh), apresenta uma área superficial de 13-22 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ e tem como principal característica uma elevada alcalinidade (pH 10-13) (Pradhan et al., 1996; Hind et al., 1999). A Tabela 1 fornece a composição, em termos percentuais, da lama vermelha apresentada por vários autores, em diferentes países. Nota-se que há uma grande variação na composição da lama vermelha, mesmo para as geradas em um mesmo país.

Tabela 1: Composição química da lama vermelha (%) gerada em diferentes países.

Referência	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Na_2O	TiO_2	MgO	CaO	K_2O	$\text{LOI}^{(1)}$	País
Wang et al., (2005)	60	15	5	16	5	-	-	-	-	Austrália
Park & Jun (2005)	16,60	23,70	22,90	11,60	6,70	-	6,70	-	-	Coréia
Peng et al., (2005)	14,17	28,72	5,81	2,70	4,09	-	-	-	-	China
Halász et al., (2005)	33 – 48	16 – 18	9 – 15	8 – 12	4 – 6	0,3 – 1	0,5 – 3,5	-	-	Hungria
Komnitsas et al., (2004)	45,58	15,65	6,96	3,26	7,07	0,19	14,84	0,07	6,42	Grécia
Tsarkiridis et al., (2004)	40,80	19,95	6,80	2,70	5,80	0,20	12,60	0,14	10,54	Grécia
Díaz et al., (2004)	37,00	12,00	-	5,00	20,00	-	6,00	-	-	Espanha

Tabela 1: Composição química da lama vermelha (%) gerada em diferentes países (continuação).

Referência	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	LOI ⁽¹⁾	País
WAO (2003)	30 – 60	10 – 20	3 – 50	2 – 8	Traço – 10	-	-	-	-	-
Ciccu et al., (2003)	30,45	17,91	9,58	12,06	8,61	0,86	7,77	0,30	12,38	-
Freitas (2003)	46,60	14,36	16,57	2,43	4,34	0,08	2,62	-	-	Brasil
Pan et al., (2003)	9,46	7,17	17,75	3,23	2,41	1,51	38,69	0,50	16,38	China
Genç et al., (2003)	34,05	25,45	17,06	2,74	4,90	1,86	3,69	-	-	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
Çengeloglu et al., (2001)	39,70 ±0,6 7	18,71 ±0,59	14,52 ±0,37	8,82± 0,96	4,90± 0,54	-	4,47± 0,56	-	8,15± 0,40.	Turquia
Yanik et al., (2001)	37,72	17,27	17,10	7,13	4,81	0,40	4,54	0,29	-	Turquia
Li (2001)	26,30	43,50	0,00	0,00	3,50	-	0,00	-	26,80	Jamaica
Li (2001)	52,60	19,10	1,00	0,40	9,00	-	4,10	-	13,80	Jamaica
Li (2001)	57,00	11,30	1,40	1,00	10,80	-	5,20	-	13,30	Jamaica
Li (2001)	54,40	4,10	2,00	1,10	9,40	-	23,1	-	5,90	Jamaica
Yalçin & Sevinç (2000)	35,73	23,29	12,08	7,40	4,08	0,76	2,81	-	-	Turquia
Kara (2000)	35,04	20,20	13,50	9,40	4,00	0,33	5,30	-	-	-
Sglavo et al., (2000)a	35,20	20,0	11,6	7,5	9,2	0,40	6,70	-	7,30	Itália
Gong & Yang (2000)	6,57	7,96	21,90	2,32	-	1,60	38,84	0,41	17,42	China
Atun & Hisarli (2000)	37,26	17,58	16,94	8,31	5,55	-	4,38	-	7,17	-
Agrawal et al., (1999) apud Agrawal (2004)	25,60 - 33,20	17 – 22,40	6,90 - 8,52	3,90 - 5,80	15,60 - 16,50	-	5,60 - 14,60	-	8,50 – 12,60	Índia
Kasliwal & Sai (1999)	30,00	15,00	8,00	4,00	18,00	0,20 - 0,40	10,00	-	12,00	-
Seth (1998) apud Agrawal et al., (2004)	62,78	15,0	6,55	4,88	3,77	-	0,23	-	9,50	India
Kumar (1998) apud Agrawal et al., (2004)	50,00 - 56,00	14,00 - 18,00	6,00 - 9,00	1,00 - 2,00	2,00 - 4,00	-	- - -	-	-	India
Kumar (1998) apud Agrawal et al., (2004)	27,00 - 29,00	18,00 - 20,00	6,00 - 8,00	4,00 - 6,00	16,00 - 18,00	-	6,00 - 12,00	-	12,60	India
Kumar (1998) apud Agrawal et al., (2004)	40,00 - 50,00	18,00 - 20,00	5,00 - 7,00	3,00 - 4,00	8,00 - 11,00	-	1,00 - 3,00	-	10,00	India
Senapati (1998) apud Agrawal et al., (2004)	36,00 - 38,00	24,00 - 26,00	5,00 - 6,00	3,00 - 3,50	16,00 - 20,00	-	0,80 - 1,00	-	-	India
Van der Laan & Van Vliet (1998)	42,80	21,30	7,00	4,80	15,40	-	8,50	-	9,90	-
Apak et al., (1998)b	37,30	17,60	16,90	8,30	5,60	-	4,40	-	7,20	Turquia
Akay et al., (1998)	38,30	14,10	2,50	-	-	-	4,10	-	-	Turquia
Marabini et al., (1998)	51,30	1,39	2,91	3,48	0,05	0,51	2,99	0,05	-	-

Tabela 1: Composição química da lama vermelha (%) gerada em diferentes países (continuação).

Referência	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	LOI ⁽¹⁾	País
Lopez et al., (1998)	31,80	21,10	6,10	4,70	22,60	0,20	4,70	-	-	Espanha
Koumanova et al., (1997)	48,40	26,60	5,50	-	2,80	0,90	1,20	-	14,60	Guiné
Singh et al., (1997)	33,10	18,2	8,80	5,80	19,60	-	2,70	-	-	Índia
Sujana et al., (1996)	56,45	16,65	3,32	4,87	4,07	0,28	0,52	-	-	Índia
Kirkpatrick (1996)	53,00	16,0	3,0	2,0	10,0	1,0	-	-	-	EUA
Pradhan et al., (1996)	62,55	14,92	10,30	-	4,10	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	56,45	15,64	3,32	-	4,07	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	36,93	12,41	10,60	-	9,93	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	47,90	16,90	4,96	-	9,29	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	38,90	16,09	6,85	-	10,29	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	43,91	11,17	11,65	-	8,24	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	33,91	18,84	6,66	-	10,29	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	26,45	13,04	5,14	-	10,12	-	-	-	-	Índia
Pradhan et al., (1996)	26,95	13,04	13,18	-	10,07	-	-	-	-	Índia
Ochsenkiihn-Petropulu et al., (1996)	42,50	15,60	9,20	2,40	5,90	-	19,70	-	-	Grécia
Gordon et al., (1996)	42,30	16,40	8,00	4,60	6,00	-	9,10	-	10,20	Jamaica
Gordon et al., (1996)	49,50	16,50	3,00	2,30	7,00	-	5,50	-	11,60	Jamaica
Piga et al., (1995)	31,60	25,30	13,20	7,70	12,10	-	7,70	-	-	Itália
Alves (1992)	49,50	17,50	9,50	2,70	5,00	-	3,00	-	-	Brasil
Shimano & Koga (1979)	45,50	20,6	4,0	3,2	8,4	-	4,0	-	-	Japão
Nakamura et al., (1969)	30 – 40	16 – 20	11 – 14	6 – 8	10 – 11	-	-	-	-	Jamaica
Nakamura et al., (1969)	55 – 60	12 – 15	4 – 5	2,00	4 – 5	-	-	-	-	Jamaica
Nakamura et al., (1969)	50 – 54	11 – 13	2,5 – 6	1,5 – 5	Traço	-	-	-	-	Jamaica

⁽¹⁾ – Perdas por ignição.

A qualidade da jazida de bauxita utilizada influencia diretamente na quantidade de lama vermelha gerada, bem como o teor de sólidos com que esta é lançada, que está diretamente ligado ao tipo de disposição adotada. Métodos conhecidos como disposição seca produzem uma menor quantidade de lama vermelha que os de disposição úmida. Levando-se em consideração estes parâmetros, pode-se afirmar que não existe uma proporção exata entre a quantidade de alumina produzida e a quantidade de lama vermelha gerada. Entretanto, [Nunn \(1998\)](#) afirma que uma típica refinaria gera entre 0,5 e 2,0 ton de lama vermelha seca por ton de alumina produzida. Para [Komnitsas et al. \(2004\)](#), dependendo da qualidade da bauxita esta faixa varia entre 0,3 ton, para bauxitas de alta qualidade (alto teor de alumínio), e 2,5, para as de baixa qualidade. No entanto, na literatura são mais comuns as referências a valores entre 1 a 2 ton de lama vermelha por ton de alumina produzida ([Brunori et al., 2004](#); [McConchie et al., 2002](#); [Wang et al., 2005](#); [Genç-Fuhrman et al., 2004](#); [Santona et al., 2006](#); [Collazo et al., 2005](#); [Nguyen & Boger, 1998](#); [Kahane et al., 2002](#); [Hind et al., 1999](#); [Agrawal et al., 2004](#); [Tan & Khoo, 2005](#); [Singh et al., 1997](#); [Collazo et al., 2005](#); [Sglavo et al., 2000](#); [Genç et al., 2003](#); [Bermann, 2002](#)).

Esta questão acaba se refletindo na falta de consenso na literatura sobre a quantidade de lama vermelha gerada anualmente no mundo. Segundo [Sujana et al. \(1996\)](#), [Kasliwal & Sai, \(1999\)](#) e [Oeberg & Steinlechner \(1996\)](#), são geradas em torno de 30 milhões de ton por ano. Mas, segundo [Cooling et al., \(2002\)](#) somente a Aluminium Company of America (Alcoa) é responsável por mais de 20 milhões ton/ano deste resíduo. De acordo com [Díaz et al. \(2004\)](#), no ano de 2000 foram geradas 84,1 milhões de ton de lama vermelha. [Nguyen & Boger \(1998\)](#) relatam que na Austrália a indústria de alumina produz 25 milhões ton/ano de lama vermelha, correspondente a 50 % da produção mundial, que seria, portanto, de 50 milhões ton/ano. Finalmente [Pradhan et al. \(1996\)](#), ao considerarem a capacidade das fábricas de alumínio, afirmam que o volume de lama vermelha gerado dobra a cada década. O fato é que a quantidade de lama vermelha gerada anualmente é gigantesca e que um resíduo gerado na ordem de milhões de ton representa um sério problema ambiental.

No Brasil, dados publicados sobre a geração de lama vermelha são praticamente inexistentes. Apesar de o país ser o 3º terceiro maior produtor mundial e contar com grandes empresas atuando na produção de alumina, como: o Consórcio de Alumínio do Maranhão (Alumar), localizada em São Luís (MA), com capacidade anual de produção de 1,325 milhões de ton; a Alumina do norte do Brasil S/A (Alunorte), localizada em Barcarena (PA), com capacidade anual de produção de 4,4 milhões de ton, sendo a maior produtora mundial de alumina; a Companhia Brasileira do Alumínio (CBA), na região de Sorocaba (SP), com capacidade anual de produção de 500 mil ton; a Alcoa, com unidades localizadas em Saramenha (MG) e Poços de Caldas (MG), com 140 mil ton e 300 mil ton de produção anual, respectivamente (Bermann, 2002; Minérios 2006).

Baseado nestes dados e os da Tabela 2, algumas inferências podem ser obtidas. Tomando-se a relação entre a geração de lama vermelha e a produção de alumina, como sendo 0,3 e 2,5 ton de lama vermelha/ton de alumina, se obtém uma estimativa da produção anual de lama vermelha no país, no período entre 1999 e 2002, Tabela 2. Observa-se que pela estimativa mais favorável seriam geradas 1,05 milhões de ton de lama vermelha. Por outro lado, considerando a estimativa mais desfavorável a quantidade de lama vermelha gerada alcançaria em 2003 a impressionante marca de 10 milhões de ton. É válido ressaltar que o período em questão é anterior à expansão da Alunorte, que elevou a sua capacidade nominal de produção de alumina de 1,6 milhões para 4,4 milhões. A estimativa feita a partir da capacidade nominal atualmente instalada, apesar de ter um caráter meramente ilustrativo, alerta para a dimensão do problema ambiental que a lama vermelha representa para o Brasil.

Tabela 2: Estimativa da geração de lama vermelha a partir da produção de alumina no Brasil.

Ano	Alumina (10 ⁶ ton)	Lama vermelha (10 ⁶ ton)	
		0,3 ton lama vermelha/ton de alumina	2,5 ton lama vermelha/ton de alumina
1999 ⁽¹⁾	3,515	1,055	8,788
2000 ⁽²⁾	3,754	1,126	9,385
2001 ⁽²⁾	3,520	1,056	8,800
2002 ⁽¹⁾	3,962	1,189	9,905
2003 ⁽¹⁾	4,000 ^(e1)	1,200	10,000
2006 ^(e2)	6,665 ^(e2)	1,999	16,662

⁽¹⁾ United States Geological Survey Mineral Resources Program (USGSMRP). 2006.

⁽²⁾ Associação Brasileira do Alumínio (ABAL). 2003.

^(e1) Estimado pela USGSMRP.(2006).

^(e2) Estimado pelos autores a partir da capacidade atual instalada.

Em 2004, somente a Alunorte produziu 2,55 milhões ton de alumina ([ALUNORTE, 2005](#)), o que corresponde a uma geração de no mínimo 1,27 milhões ton de lama vermelha. A recém inaugurada ampliação da fábrica aumentou a capacidade nominal para 4,175 milhões ton/ano de alumina, porém até 2008 uma nova ampliação está prevista, elevando a capacidade de produção para 6,8 milhões de ton/ano ([ALUNORTE, 2005](#); [MINERIOS & MINERALES, 2006](#)). Portanto, a geração de lama vermelha pela Alunorte, que alcançou no mínimo 1,25 milhões ton/ano, em breve chegará a 2,04 milhões ton/ano, ou seja, um aumento de mais de 70% em relação a 2002.

A literatura apresenta controvérsia quanto à toxicidade da lama vermelha. A lama vermelha não é particularmente tóxica ([Nunn, 1998](#)), inclusive a Environmental Protec Agency (EPA) não classifica a lama vermelha como um rejeito perigoso (EPA, 2005). Entretanto, [Hind et al. \(1999\)](#), consideram-na tóxica, na medida em que podem constituir um perigo para as populações vizinhas, devido à presença de elevados valores de cálcio e hidróxido de sódio. Outros relatos encontrados na literatura apontam para os riscos ao meio ambiente associados a lama vermelha, em função de sua elevada alcalinidade e capacidade de troca iônica ([Li, 2001](#); [Collazo et al., 2005](#)).

Diante do exposto, pode-se considerar que a lama vermelha representa um passivo ambiental importante para a indústria de beneficiamento de alumínio, devido aos riscos de contaminação do meio ambiente e aos custos associados ao seu manejo e disposição, os quais representam uma grande parte dos custos de produção da alumina. Como constatação, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, cita entre as atividades industriais mais poluentes a indústria de metais não-ferrosos e dentre estes, a do alumínio ([Donaire, 1995](#)).

2.1 Métodos de Disposição Final da Lama Vermelha

A lama vermelha faz parte de um grupo de rejeitos conhecidos como “tailings”, resultantes do processamento de minérios pela indústria extrativista mineral. Estes resíduos são solos que continham o

mineral de interesse ou resultam da moagem de rochas. Dependendo do processo de extração, podem ser adicionadas substâncias químicas como, por exemplo, a soda cáustica empregada no refino da alumina. Os “tailings” caracterizam-se por serem lamas formadas por partículas muito finas ([Fahey et al., 2002](#); [Vick, 1983](#)).

Os métodos convencionais de disposição de lamas, ou métodos úmidos, são assim denominados devido à grande quantidade de água de processo que segue com o material sólido para disposição. Os métodos úmidos aplicáveis à lama vermelha consistem em grandes diques onde a lama vermelha é disposta com baixo teor de sólidos. A separação de fases ocorre no local de disposição, onde o material sólido sedimenta e surge um sobrenadante alcalino. A operação é simples e barata, consistindo na sedimentação natural da fase sólida e na recirculação do sobrenadante para a fábrica. Porém o potencial de impacto sobre o meio ambiente é alto. A área de disposição final necessária é grande, 100 a 200 acres em média. Os custos associados são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, feita normalmente através de membranas plásticas ou da aplicação de camada de material impermeável, devido aos riscos de contaminação do solo e do lençol freático, entre outros componentes. A vida útil da área de disposição é curta, normalmente entre 4 a 7 anos, e a reabilitação da área é um processo lento ([Kirkpatrick, 1996](#); [Nguyen & Boger, 1998](#); [Jamaican Bauxite Case, 2006](#)). Os riscos com relação ao rompimento dos diques também estão presentes, e representam um motivo de preocupação para a população vizinha ([Hind et al., 1999](#); [Fahey et al., 2002](#), [Sofrá & Boger, 2002](#); [Li, 2004](#)).

Modernamente os métodos conhecidos como métodos secos ou semi-secos de disposição tendem a serem aplicados com mais frequência. Estes métodos surgiram a partir dos avanços ocorridos nas técnicas de deságüe dos “tailings”. Os métodos secos de disposição apresentam as seguintes vantagens sobre os métodos úmidos: melhor manuseio, maior segurança, geração de um menor volume de lama, menor área ocupada e reabilitação mais fácil da área ([Nguyen & Boger, 1998](#); [Hind et al., 1999](#); [Sofrá & Boger, 2002](#); [Fourie, 2002](#); [Agrawal et al., 2004](#)). Nestes métodos a lama é disposta com um teor de sólidos mais elevado, resultando em uma textura pastosa.

Dentre os métodos de disposição a seco, o mais comumente aplicado à lama vermelha é o “dry-stacking”. Este método consiste na disposição progressiva da lama vermelha. A área de disposição é dividida em leitos de secagem, onde a lama vermelha é descarregada até atingir uma determinada altura, passando-se a seguir para o leito de secagem livre e assim por diante. Quando todos os leitos de secagem estiverem ocupados repete-se o ciclo, depositando uma nova camada de lama vermelha no leito de secagem inicial. O “dry-stacking” permite a diminuição da umidade através da evaporação e da drenagem ([Sofrá & Boger, 2002](#); [Nunn 1998](#)).

Uma variante do “dry-stacking” é a secagem solar. Essa técnica é particularmente aplicável para áreas onde a taxa de evaporação é elevada. A secagem solar utiliza leitos de secagem com baixa profundidade (100 mm) para facilitar a evaporação ([Nunn, 1998](#)).

Outro método utilizado é a disposição de tailing espessado (Thickened tailing disposal). Neste método a lama vermelha é disposta no ponto central da área de disposição, formando um monte cônico. A geometria cônica elimina a necessidade de barragens ou diques, há um aumento na estabilidade do depósito, facilitando a reintegração da área ao meio ambiente ([Sofrá & Boger, 2002](#); [Nguyen & Boger, 1998](#)).

Normalmente “tailings”, como a lama vermelha, são transportados através de bombeamento. Em várias plantas industriais é comum o bombeamento da lama vermelha por distâncias de 3 a 6 km até os locais de disposição ([Oeberg & Steinlechner, 1996](#); [Purnell, 2004](#)). Suspensões de material mineral com elevada concentração, como a lama vermelha, são geralmente fluidos não-newtonianos ([Sofra & Boger, 2002](#)). Estudos reológicos revelaram que a lama vermelha é fortemente tixotrópica e pseudoplástica ([Sofra & Boger, 2002](#); [Nguyen & Boger, 1998](#)). Portanto, dois fatores que devem ser levados em consideração durante o deságüe da lama vermelha são a viscosidade da lama vermelha e a distância a ser vencida. Para “tailings” altamente espessados é preferível a utilização de tratores e vagões no transporte.

O método de disposição conhecido como “off-shore disposal” consiste no lançamento da lama vermelha em um corpo hídrico receptor, rio ou oceano. Este tipo de disposição final foi praticamente abandonado. Das 84 plantas de beneficiamento de alumina existentes no mundo, somente 7 ainda utilizam este tipo de disposição devido à escassez de área para disposição final, persistindo em países como Japão e Itália ([Vick, 1983](#); [Agrawal et al., 2004](#), [Hyun et al., 2005](#)).

A neutralização da lama vermelha com a utilização de ácido sulfúrico (H₂SO₄) é o método mais comum para minimizar os riscos ambientais com relação à sua causticidade. Outros processos têm sido pesquisados pela Alcoa como a carbonatação, através da injeção de CO₂, e através da adição de água do mar contendo altas concentrações de sais de Mg, que atuam como agentes neutralizadores ([Fahey et al., 2002](#); [Colling et al., 2002](#); [McConchie et al., 2002](#)).

No Brasil informações sobre o tipo de disposição empregado em cada refinaria são escassas. A Alunorte utiliza o método de disposição de lama por alta densidade, trata-se de um processo de “dry-stacking” patenteado pela empresa alemã *Giulini* ([Alunorte, 2004](#)). Este método permite que a lama vermelha

seja lançada nas lagoas de disposição na forma de uma pasta contendo cerca de 60% em peso na fase sólida, evitando a segregação de líquidos e adquirindo a consistência de um solo natural em curto espaço de tempo, facilitando a recuperação da área para outros fins ([Alunorte, 1994](#); [Alunorte, 2004](#)).

2.2 Deságüe da Lama Vermelha

A principal função do deságüe é recuperar parte do NaOH presente na lama vermelha. O deságüe também possibilita a redução da quantidade de material encaminhado para descarte.

Segundo [Nunn \(1998\)](#), a utilização de espessadores foi o primeiro processo de deságüe aplicado à lama vermelha. Os espessadores foram amplamente aplicados durante as décadas de 1950 e 1960 e ainda hoje são utilizados. A eficiência dos espessadores na concentração de sólidos é de 20 a 30%. Subsequentemente, a utilização de filtros rotatórios a vácuo prevaleceu como etapa final do deságüe antes da disposição final. A eficiência destes filtros é função da filtrabilidade da lama vermelha produzida na refinaria, alcançando valores entre 40 e 50% de teor de sólidos.

Mais recentemente foram desenvolvidos os espessadores de alta performance. Essa tecnologia envolve a adição de floculantes, alcançando taxas de concentração de sólidos mais elevadas e apresentando eficiência ente 28 e 55%. Outra tecnologia que apresenta boas perspectivas de aplicação no deságüe da lama vermelha são os filtros hiperbáricos, que alcançaram em testes, em escala piloto, taxas de 70 a 80 % de teor de sólidos ([Nunn, 1998](#)). Apesar das boas indicações, a literatura não registra aplicações de filtros hiperbáricos em escala real, possivelmente devido a dificuldades operacionais.

[Nunn \(1998\)](#) analisou os fatores econômicos mais importantes relacionados às tecnologias de deságüe descritas e observou que a eficiência na recuperação de NaOH é diretamente proporcional ao consumo de energia. É importante ressaltar que o custo da energia é um atributo da localidade onde se encontra instalada a indústria, envolvendo questões que vão além do custo da energia propriamente dita. Foi também observado que os filtros hiperbáricos apresentam menor perda de NaOH e menor custo operacional e, por outro lado, que os espessadores de alta performance utilizam menos mão-de-obra e têm menor custo de capital. Por fim, é válido salientar que, além dos fatores econômicos diretos, outros fatores como manutenção da boa imagem da empresa, bem como, o afastamento de riscos de multas pelos órgãos ambientais podem influenciar na escolha da tecnologia a ser adotada.

2.3 Problemas Decorrentes da Disposição da Lama Vermelha

Como a maioria dos rejeitos, no passado a lama vermelha era simplesmente descartada em algum corpo hídrico receptor, como mares e rios ([Kirkpatrick, 1996](#); [Wills, 1997](#)). A disposição não adequada da lama vermelha pode acarretar em problemas como: *i*) Contaminação da água de superfície e subterrânea por NaOH, ferro, alumínio ou outro agente químico; *ii*) Contato direto com animais, plantas e seres humanos; *iii*) O vento pode carrear pó dos depósitos de lama vermelha seca, formando nuvens de poeira alcalina; *iv*) Impacto visual sobre uma extensa área.

Alguns casos de acidentes ambientais provocados pela disposição inadequada da lama vermelha em vários países são relatados na literatura. Problemas relacionados com o encerramento das atividades sem a adequada proteção do meio ambiente também são reportados.

Na antiga Iugoslávia, [Salopek & Strazisar \(1992\)](#) relatam que durante o funcionamento das instalações em Kidricevo, onde se utilizava barragens como meio de disposição, formando lagoas de lama vermelha, foram registradas concentrações de 5 g/L Na₂O e 3 g/L Al₂O₃ nas águas residuárias, além de poluição sistemática das águas subterrâneas com variação de pH entre 11,5 e 8 e condutividade elétrica entre 4.982 e 924 µS/cm a distâncias de até 2 km das lagoas. Ocorrências semelhantes foram observadas em outras localidades, como Podgorica, e Mostar, inclusive com a contaminação do aquífero que abastecia a população local. Nas instalações de Obrovac, a água residuária com a ajuda dos fortes ventos da região, principalmente no inverno e primavera, forma gotículas que se espalham por quilômetros, formando uma chuva caustica, que atinge não somente partes da fábrica, como instalações vizinhas. Houve ressecamento total da vegetação em uma área de 500 m em redor da lagoa e comprometimento parcial por vários quilômetros. Após o encerramento das atividades das instalações de Mostar houve ressecamento da lagoa de disposição o que causou o carreamento das partículas finas e formando nuvens de poeira, gerando problemas especialmente para os fazendeiros vizinhos.

No Brasil, em 2003, houve no município de Barcarena (PA) um vazamento de lama vermelha, atingindo as nascentes do rio Murucupi. Da nascente a foz do rio houve mudança na tonalidade das águas, com o aumento nos teores de alumínio e sódio e possível contaminação do aquífero ([De Jesus et al., 2004](#)). Em São Paulo (SP) ocorreu um vazamento em 2004, de cerca de 900.000 litros de lama vermelha, atingindo o córrego do Bugre, rio Varzão e Pirajibu, na bacia do Rio Sorocaba. Como consequência houve alteração da

qualidade das águas tornando-as impróprias (ofensivas à saúde), além de provocar danos à fauna (mortalidade de peixes) e à vegetação (CETESB, 2004; Rondon, 2004).

Na Jamaica, a não utilização de técnicas adequadas de disposição da lama vermelha resultou na contaminação de aproximadamente 200 milhões de m³ de águas subterrâneas (Fernandez, 2005). Também ocorreu a contaminação de águas superficiais, a disposição de lama vermelha em lagoas na localidade de Mont Diablo acarretou na contaminação das águas do lago Moneague, as quais se tornaram impróprias, devido o elevado pH. Este tipo de impacto afeta o turismo, outra atividade econômica muito importante da ilha (Jamaican Tourism Impacts, 2006). A população da Jamaica apresenta uma pré-disposição genética para a hipertensão, a qual pode ser agravada pelos altos níveis de sódio devido à contaminação da água subterrânea (Jamaican Bauxite Case, 2006).

2.4 Aplicações Alternativas para a Lama Vermelha

Durante muito tempo a lama vermelha foi considerada um resíduo inaproveitável para a indústria do alumínio (Chaves, 1962). Entretanto, os custos econômicos e os riscos ambientais associados à disposição da lama vermelha têm motivado companhias e pesquisadores na busca por alternativas ambientalmente mais seguras, que possibilitem a redução do volume de resíduo encaminhado para a disposição final.

Pesquisas têm sido desenvolvidas visando à recuperação de ferro, titânio e outros metais. Porém, até o momento, nenhum processo apresentado na literatura se mostrou economicamente viável (Pradhan et al., 1996; Slavo et al., 2000a; Hind et al., 1999; Piga et al., 1995; Marabini et al., 1998).

As aplicações para a construção civil são variadas. A Kaiser Aluminium & Chemical Company utilizou a lama vermelha como material para recobrimento de aterros e pavimentação (Kirkpatrick, 1996). A utilização da lama vermelha como insumo para produção de cimentos especiais, também foi pesquisada, mas esta aplicação encontra problemas devido à alcalinidade da lama vermelha (Shimano & Koga, 1979; Singh et al., 1997; Tsakiridis et al., 2004; Pan et al., 2003).

A lama vermelha também encontra aplicações na indústria cerâmica (Slavo et al., 2000a; Slavo et al., 2000b). Yalçin & Sevinç (2000) propuseram a produção de revestimentos cerâmicos (porcelanas, vítricos e eletroporcelanas) usando a lama vermelha. Outros pesquisadores propõem a utilização da lama vermelha na confecção de tijolos, telhas, isolantes, etc. (Nakamura et al., 1969; Kara, 2005; Singh & Garg, 2005).

Outras aplicações para a lama vermelha estão no tratamento de superfícies: proteção do aço contra corrosão (Collazo et al., 2005; Díaz et al., 2004) e na melhoria das características termoplásticas de polímeros (Park & Jun, 2005).

Na agricultura é utilizada como corretivo para solos ácidos, enriquecimento de solos pobres em ferro (Hind et al., 1999), no aumento da retenção de fósforo pelo solo (Summers et al., 2002) e na imobilização de metais pesados em solos contaminados (Ciccu et al., 2003; Lombi et al., 2002).

No campo do meio ambiente a lama vermelha é bastante utilizada principalmente na remediação de áreas contaminadas e no tratamento de efluentes líquidos, tendo sido utilizada com sucesso no tratamento de águas ácidas de minas (Fahey et al., 2002; Doye & Duchesne, 2003), assim como na remediação de solos contaminados por metais pesados, fósforo e nitrogênio (Santora et al., 2006; Phillips, 1998).

Na indústria química, as utilizações da lama vermelha tem se baseado em sua ação como catalisador em várias aplicações como a remoção de enxofre em querosene (Singh et al., 1993), hidrogenação do antraceno (Alvarez et al., 1999; Llano et al., 1994), degradação de compostos orgânicos voláteis (COV) (Halász et al., 2005), degradação de cloreto de polivinila (PVC) em óleos combustíveis (Yanik et al., 2001), degradação de organoclorados (Ordóñez et al., 2002). As propriedades de adsorção da lama vermelha são aproveitadas no tratamento de efluentes, sendo neste caso, necessário ativa-la. Sua ativação pode ser feita. Sua ativação pode ser feita através de tratamento térmico por calcinação em temperaturas próximas a 400 °C, o que resulta em um aumento de 3 a 4 vezes em sua área superficial (Sujana et al., 1996). Essa temperatura é relativamente baixa quando comparada à necessária para a ativação (esfoliação) de outros materiais como, por exemplo, a vermiculita, que sofre expansão somente na faixa de 800 a 1000 °C (França et al, 2002). A lama vermelha também pode ser ativada através de tratamento químico com ácidos (Alvarez et al., 1999; Apak et al., 1998b) ou com águas ricas em íons de Mg²⁺, como a água do mar ou águas de salinas (Brunori et al., 2005).

A lama vermelha tem sido aplicada em processos de adsorção para vários tipos de adsorbatos, em efluentes sintéticos e reais, como metais pesados Cu(II), Pb(II), Cd (II), Cr(V) e ânions como fósforo (PO₄⁻³) e arsênico (As) e pigmentos têxteis (Genç et al., 2003; Genç-Fuhrman et al., 2005; Genç-Fuhrman et al., 2004; Apak et al., 1998a; Apak et al., 1998b; Gupta et al., 2001; Silva Filho et al., 2005; Wang et al., 2005; Altundogan et al., 2002; Çengelöglu et al., 2002; Komnitas et al., 2004; Brunori et al., 2005; Akay et al.; 1998; Koumanova et al., 1997; Namasivayam & Arasi, 1997) No tratamento de esgotos domésticos, tanto para a remoção de fósforo e formas de nitrogênio (NH₄⁻ e NO₃⁻) como para a remoção de vírus e bactérias (Lopez et al., 1997; Ho et al., 1991). De Souza (2000) e De Souza et al. (2001) utilizaram a lama vermelha

para a adsorção e clarificação de chorume, obtendo uma redução na carga orgânica de 56,67 % e 60 % de remoção de cor.

Alguns produtos desenvolvidos a partir da lama vermelha para o tratamento de matrizes ambientais receberam denominação comercial e alguns foram patenteados. A Kaiser Aluminium & Chemical Company desenvolveu um adsorvente denominado de *Cajunite*[®] (Kirkpatrick, 1996). A Virotec International LTd. (Austrália) desenvolveu um processo em que se obtém um adsorvente a partir da lama vermelha neutralizada com água do mar, que patenteou como *Basecon*[®] e o produto obtido como Bauxsol (Brunori et al., 2005; McConchie et al., 2002). A Alcoa conjuntamente com o Departamento de Agricultura do Oeste da Austrália desenvolveram o *Alkaloam*[®], para uso agrícola (Summers et al., 2002).

2.5 Propostas de Aplicações para a Lama Vermelha no Brasil

As linhas de pesquisa desenvolvidas na UFPE envolvem principalmente o Departamento de Engenharia Química e o Departamento de Engenharia Civil, estão centradas em uma visão holística da problemática ambiental, buscando através da valoração ambiental da lama vermelha, alternativas técnica e economicamente viáveis para a indústria brasileira e em especial para o setor produtivo pernambucano. Dentre os projetos, destacam-se:

- Tratamento de efluentes oleosos: Tem por objetivo desenvolver um processo de tratamento, em nível de polimento de efluentes oleosos, tais como águas de produção e efluentes de laminação, através de adsorção em lama vermelha. Objetivo final desta linha de pesquisa é desenvolver um reator para a adsorção de hidrocarbonetos, metais pesados e outros elementos indesejáveis, tais como o enxofre, em um leito de lama vermelha.

- Tratamento de efluentes têxteis: Estuda o desenvolvimento de um reator para a remoção de corantes presentes em efluentes de industriais têxteis. Estudos realizados até o momento apresentaram uma remoção de 70 % em média do corante remazol black B (Silva Filho et al., 2005).

- Processos de oxidação avançada, reagente Fenton e catalise heterogênea: Pretende investigar as possibilidades de utilização da lama vermelha em processos oxidativos avançados (POAs), como fonte de íons de ferro e de TiO₂. Esses processos de tratamento são considerados como métodos promissores para a remediação de solos e águas residuárias contendo poluentes orgânicos não-biodegradáveis (Rodríguez, 2003). Dentre os POAs de interesse para a pesquisa estão o reagente Fenton e processos heterogêneos envolvendo TiO₂.

O poder oxidante do reagente Fenton (H₂O₂/Fe²⁺) é atribuído aos radicais hidroxilas (OH⁻) provenientes da decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio em meio ácido, cuja reação geral é representada pela Eq. (4)



Por outro lado, a fotocatalise heterogênea utilizando o semicondutor TiO₂ tem sido amplamente estudada para a descontaminação ambiental e o tratamento de efluentes líquidos e ou gasosos. O TiO₂ age como um semicondutor de elétrons propiciando a formação de radicais hidroxilas.

Resultados iniciais obtidos na remoção do corante Remazol Black B, em média 97%, demonstram ser promissora a utilização da lama vermelha como fonte de íons de ferro para o reagente Fenton (Silva Filho et al., 2006).

3 COMENTÁRIOS FINAIS

Os custos com a disposição e o gerenciamento da lama vermelha representam grande parte dos custos de produção da alumina. Os custos ambientais associados à disposição da lama vermelha também são altos. Apesar dos avanços tecnológicos obtidos nos últimos anos, a disposição da lama vermelha ainda é um grande problema para a indústria de beneficiamento do alumínio. Portanto, a busca por novas tecnologias, que visem o aproveitamento da lama vermelha representando alternativas capazes de senão solucionar, pelo menos amenizar o problema é fundamental para o Brasil, sexto maior produtor mundial de alumina, e, portanto um dos maiores geradores de lama vermelha no mundo.

4 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Alunorte S/A pelo fornecimento da lama vermelha utilizada nos experimentos realizados.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, <http://www.abal.org.br>. Acessado em julho de 2003.
- [2] ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, <http://www.abal.org.br/conheca/html/#link1>. Acessado em julho de 2005.
- [4] AGRAWAL, A., SAHU, K. K., PANDEY, B. D., “Solid waste management in non-ferrous industries in Índia”, *Resources, Conservation & Recycling* n. 42, pp. 99-120, 2004.
- [5] AKAY, G., KESKINLER, B., ÇAKICI, A., DANIS, U., “Phosphate Removal from Water by Red Mud using Crossflow Microfiltration”, *Water Resarch*, v. 32, n. 3, pp. 717-726, 1998.
- [6] ALTUNDOGAN, H. S., ALTUNDOGAN, S., TÜMEN, F., BILDIK, M., “Arsenic adsorption from aqueous solutions by activated red mud”, *Waste Management* n. 22, pp. 357–363, 2002.
- [7] ALUNORTE – Alumina do norte do Brasil S/A, <http://www.alunorte.net>. Acessado em junho de 2004.
- [8] ALUNORTE – Alumina do norte do Brasil S/A. *Relatório da administração no ano de 2004*, <http://www.alunorte.net>. Acessado em novembro de 2005.
- [9] ALUNORTE, “Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA)”, Belém, PA, 1994.
- [10] ÀLVAREZ, J., ORDÓÑEZ, S., ROSAL, R. SASTRE, H., DÍEZ, F. V., “A new method for enhancing the performance of red mud as a hydrogenation catalyst”, *Applied Catalysis A: General*, n. 180, pp. 399-409, 1999.
- [11] ALVES, M. C. M., *Comportamento de sedimentação e adensamento de uma lama vermelha*, Tese de doutorado. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1992.
- [12] APAK, R., GLUÇU, K., TURGUT, M.H., “Modeling of Cooper (II), Cadmium (II) and Lead (II) adsorption on red mud”, *Journal of Colloid and Interface Science*, n. 203, pp. 122-130, 1998a.
- [13] APAK, R., TUTEM, E., HUGUL, M., HIVAL, E., “Heavy metal cation retention by unconventional sorbents: red mud and fly ashes”, *Water Research* v. 39, n. 2, pp. 430-440, 1998b.
- [14] ATUN, G, HISARLI, G., “A study of surface properties of red mud by potentiometric method”, *Journal of Colloid and Interface Science*, n. 228, pp. 40–45, 2000.
- [15] BERMANN, C., “Exportação brasileira de produtos intensivos em energia: implicações sociais e ambientais”, Fórum Brasileiro de ONG’s e Movimentos Sociais para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, Rede Brasileira pela Integração dos Povos (REBRIP), 2002.
- [16] BRUNORI, C., CREMISINI, C., MASSANISSO, P., PINTO, V., TORRICELLI, L., “Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 117, n.1, pp. 55-63, 2005.
- [17] ÇENGELGLU, Y., KIR, E., ERSÖZ, M., “Recovery and Concentration of Al(III), Fe(III), Ti(IV), and Na(I) from Red Mud”, *Journal of Colloid and Interface Science*, n. 244, pp. 342–346, 2001.
- [18] CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, *CBA multada por poluir rios da região de Sorocaba*, <http://www.cetesb.gov.br/noticia>. Acessado em julho de 2004.

- [19] CHAVES, A. G. F., “A lama vermelha e sua eliminação da fábrica de alumina”, In: *2º semana de estudos. Alumínio e Zinco. Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos dos Alunos da Escola de Minas de Ouro Preto*, n. 2, Ouro Preto, Minas Gerais, 1962.
- [20] CICCUCO, R., GHIANI, M., SERCI, A., FADDA, S., PERETTI, R., ZUCCA, A., “Heavy metal immobilization in the mining-contaminated soils using various industrial wastes”, *Minerals Engineering*, n. 16, pp. 187–192, 2003.
- [21] COLLAZO, A., FERNÁNDEZ, D., IZQUIRDO, M., NÓVOA, X.R., PEREZ, C., “Evaluation of red mud as surface treatment for carbon steel painting”, *Process in Organic Coating*, n. 52. pp.351-358, 2005.
- [22] COOLING, D. J., HAY, P. S. GUILFOYLE, L., “Carbonation of bauxite residue”, In: *Proceedings of the 6th international alumina quality workshop*, v. 2, pp. 185-190, Brisbane, Austrália, setembro de 2002.
- [23] DE JESUS, I. M., SANTOS, E.C.O, BRABO, E. S., LIMA, M. O., MENDES, R. A., FAIAL, K. R. F., CARNEIRO, B. S., MASCARENHAS, A. S., SILVA, J. K. R., CARNEIRO, J. S., RODRIGUES, A. V., BATISTA, E. F., FAIAL, K. F., BARBOSA, F. F. S., “Avaliação dos impactos ambientais no rio Murucupi em decorrência do transbordo de efluentes de uma bacia de resíduos sólidos no município de Barcarena-Pará”, In: *Congresso da Associação Brasileira de Química*, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2004.
- [24] DE SOUSA, G. M. P., “Avaliação do Sistema de Tratamento do Chorume Utilizado no Aterro Sanitário do Aurá: Proposta de Utilização da Lama Vermelha como Adsorvente da Matéria Orgânica Presente no Chorume”, Dissertação de M.Sc., PPEQ/UFPa, Belém, PA, Brasil, 2000.
- [25] DE SOUZA, M. P. G., MENEZES, L. B. C., DE SOUZA, C. A. G., NEVES, R. F., “Utilização de lama vermelha como adsorventes da matéria orgânica presente no chorume (Aterro Sanitário do Aura, Belém – Pará)”. In: *XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 2001.
- [26] DIAZ, B., JOIRET, S., KEDDAM, M., NÓVOA, X. R., PÉREZ, M. C., TAKENOUTI, H., “Passivity of iron in red mud’s water solutions”, *Eletrochimica Acta*, n. 49, pp. 3039-3048, 2004.
- [27] DONAIRE, D., “Gestão ambiental na empresa”, São Paulo, Atlas, 1995.
- [28] DOYE, I., DUCHESNE, J., “Neutralization of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigation using bath-leaching test”, *Applied Geochemistry*, n. 18, pp.1197-1213, 2003.
- [29] EPA – Environmental Protection Agency, *Electronic code of federal regulations. Title 40, Part 261, Sect 4 (b) (7) (ii) (c)*, <http://ecfr.gpoaccess.gov>. Acessado em outubro de 2005.
- [30] FAHEY, M., NEWSON, T. A. e FUJIYASU, Y., “Engineering with tailings”, In: *Environmental Geotechnics*, v. 2, Balkema, pp. 947-973, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [31] FERNANDEZ, B., “Contamination of water resources by the bauxite/alumina operations in Jamaica”, http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_verde/R-111.htm, Acessado em setembro de 2005.
- [32] FOURIE, A. B., “Thickened tailings: is it a revolution in the making?”, In: *Environmental Geotechnics*, v. 2, Balkema, pp. 977-986, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [33] FREITAS, R. A. S., “Comportamento de geotêxteis como filtros em resíduos – Fosfogesso e lama vermelha”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [34] GENÇ, H., TJELL, J. C., McCONCHIE, D., SCHUILLING, O., “Adsorption of arsenate from water using neutralized red mud”, *Journal of Colloid and Interface Science*, n. 264, pp. 327-334, 2003.

- [35] GENÇ-FUHRMAN. H., BREGNHOJ, H., MCCONCHIE, D., “Arsenate removal from water using sand-red mud columns”, *Water Research*, n. 39, pp. 2944-2954, 2005.
- [36] GENÇ-FUHRMAN. H., TJELL, J. C., MCCONCHIE, D., “Increasing the arsenate adsorption capacity of neutralized red mud (Baouxsol)”, *Journal of Colloid and Interface Science*, n. 271, pp. 313-320, 2004.
- [37] GÓIS, C. C., LIMA, R. M. F., MELO, A. C., “Sedimentação de resíduo Bayer utilizando floculantes hidroxamatos e poliacrilamida”, *Revista Escola de Minas*, v. 56, n.2, pp. 119-122, Ouro Preto, Minas Gerais, Abril/Junho, 2003.
- [38] GONG, C., YANG, N., “Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud - slag cementitious material”, *Cement and Concrete Research*, n. 30, pp. 1013-1016, 2000.
- [39] GORDON, J. N., PINNOCK, W.R., MOORE, M. M., “A Preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites”, *Cement and Concrete Composites*, n. 18, pp. 371-379, 1996.
- [40] GUPTA, V. K., GUPTA, M., SHAMA, S., “Process developed for removal of lead and chromium from aqueous using red mud: an aluminium industry waste”, *Water Research*, v. 35, n. 5, pp. 1125-1134, 2001.
- [41] HABASHI, F. A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, n.79, pp. 15-22, 2005.
- [42] HALÁSZ, J., HODOS, M., HANNUS, I., TASI, G., KIRICSI, I., “Catalytic detoxification of C2-chlorohydrocarbons over iron-containing oxide and zeolite catalysts”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemistry Eng. Aspects*, n. 265, pp. 171-177, 2005.
- [43] HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCCOTT, S. C., “The surface chemistry of Bayer process solids: a review”, *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, n. 146, pp.359-374, 1999.
- [44] HO, G. E., GIBBS, R. A., METHREW, K., “Bacteria and virus removal from secondary effluent in sand and red mud columns”, *Water Resource*, n. 26. pp. 261-270, 1991.
- [45] HYUN, J., ENDOH, S., MASUDA, K., SHIN, H., OHYA, H., “Reduction of chlorine in bauxite residue by fine particle separation”, *International Journal of Mineral Processing*, n. 76, pp. 13-20, 2005.
- [46] IOM3 - Institute of Materials, Minerals and Mining, <http://www.iom3.org>, Acessado em setembro de 2005.
- [47] JAMAICAN BAUXITE CASE, <http://www.american.edu/TED/Jamaica.htm>. Acessado em maio de 2006.
- [48] JAMAICA TOURISM IMPACTS (JAMTOUR), <http://www.american.edu/TED/JAMTOUR.htm>. Acessado em maio de 2006.
- [49] KAHANE, R., NGUYEN, T. SCHWARZ, N. P., “CFD modeling of thickeners at Worsley Alumina Pty Ltd”, *Applied Mathematical Modelling*, n. 26, pp. 281-296, 2002.
- [50] KARA, M. “BCR - From Byproduct To Brick: Using Red Mud Waste as a Construction Material”, http://www.ceramicindustry.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0,2710,8119,00.html. Acessado em setembro de 2005.
- [51] KASLIWAL, P, SAI, P.S.T., “Enrichment of titanium dioxide in red mud: a kinetic study”, *Hydrometallurgy*, n. 53, pp. 73–87, 1999.
- [52] KIRKPATRICK, D.B., “Red mud product development”, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1996.

- [53] KOMNITSAS, K., BARTZAS, G., PASPALIARIS, I., “Efficiency of limestone and red mud barriers: laboratory column studies”, *Minerals engineering*, n. 17, pp. 183-194, 2004.
- [54] KOUMANOVA, B., DRAME, M., POPANGELOVA, M., “Phosphate removal from aqueous solutions using red mud wasted in bauxite Bayer's process”, *Resources, Conservation and Recycling*, n.19, pp. 11-20, 1997.
- [55] LI, L. Y., “A study of iron mineral transformation to reduce red mud tailings”, *Waste management*, n. 21, pp. 525-534, 2001.
- [56] LLANO, J. J., ROSAL, R., SASTRE, H., DÍEZ, F. V., “Catalytic hydrogenation of anthracene oil with red mud”, *Fuel*, n. 73, Issue 5, pp. 688-694, 1994.
- [57] LOMBI, E., ZHAO, F. J., ZHANG, G., SUN, B., FITZ, W., ZHANG, H., McGRATH, S. P., “In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: chemical assessment”, *Environmental Pollution*, n. 118, pp.435–443, 2002.
- [58] LOPEZ, E., SOTO, B., ARIAS, M., NUNEZ, A., RUBINOS, D., BARRAL, M. T., “Adsorbent properties of red mud and its use for wastewater treatment”, *Water Research*, v. 32, n 4, pp. 1314-1322, 1998.
- [59] MARABINI, A. M., PLESCIA, P., MACCARI, D., BURRAGATO, F., PELINO, M., “New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramics and glass- and rock-wool fibre”, *International journal of Mineral Processing*, n. 53, pp. 121-134, 1998.
- [60] McCONCHIE, D., CLARK, M., DAVIES-McCONCHIE, F., “New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud)”, In: *Proceedings of the 6th international alumina quality workshop*, Brisbane, Australia, pp. 327-332, 2002.
- [61] MINERIOS & MINERALES, “Alunorte: de 1,6 a 4,4 milhões t/ano de alumina, em cinco anos”, *Minérios & Minerales*, n. 287, pp.16-19, Março/Abril, 2006, www.minerios.com.br. Acessado em julho de 2006.
- [62] NAKAMURA, H. H., BORTZ S. A E SCHWARTZ, M. A., “Use of Bauxite wastes for lighweighth nuilding products”, In: *71st Annual Meeting of the American Ceramic Society*, pp. 248-250, Washington, D. C., Estados Unidos, 1969.
- [63] NAMASIVAYAM, C., ARASI, D. J. S. E., “Removal of congo red from wastewater by adsorption onto waste red mud”, *Chemosphere*, v. 34, n. 2, pp. 401417, 1997.
- [64] NGUYEN, Q. D., BOGER, D. V., “Application of rheology to solving tailings disposal problems”, *International journal of Mineral Processing*, n. 54, pp. 217-233, 1998.
- [65] NUNN, R. F., “Advances in red mud dewatering and disposal technologies”, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1998.
- [66] OCHSENKIIHN-PETROPULU, M., LYBEROPULU, T., OCHSENKIIHN, K. M., PARISSAKIS, G., “Recovery of lanthanides and yttrium from red mud leaching by selective”, *Analytica Chimica Acta*, n. 319. pp. 249-254, 1996.
- [67] OEBERG, N. C. R., STEINLECHNER, E. H., “Red mud and sands handling new thoughts on an old problem”, *Light Metals*, pp. 67-73, 1996.
- [68] ORDÓÑEZ, S., SASTRE, H., DÍEZ, F. V., “Hydrodechlorination of tetrachloroethylene over sulfided catalysts: kinetic study”, *Catalysis Today*, n. 73, pp. 325-331, 2002.
- [69] PAN, Z., LI, D., YU, J., YANG, N., “Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud–slag cementitious material”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, pp. 1437–1441, 2003.

- [70] PARK, S. J., SEO, D. I., NAH, C., “Effect of Acidic Surface Treatment of Red Mud on Mechanical Interfacial Properties of Epoxy/Red Mud Nanocomposites”, *Journal of Colloid and Interface Science*, n. 251, pp. 225–229, 2002.
- [71] PARK, S., JUN, B., “Improvement of red mud polymer-matrix nanocomposites by red mud surface treatment”, *Journal of Colloid and Interface*, n. 284, pp. 204-209, 2005.
- [72] PENG, F., LIANG, K. M., SHAO, H., HU, A. M., “Nano-crystal glass-ceramics obtained by crystallization by vitrified red mud”, *Chemosphere*, n. 59, pp. 899-903, 2005.
- [73] PHILLIPS, I. R., “Use of Soil Amendments to Reduce Nitrogen, Phosphorus and Heavy Metal Availability”, *Journal of Soil Contamination*, v. 7, n. 2, pp.191-112, 1999.
- [74] PIGA, L., POCHETTI F., STOPPA, L., “Application of thermal analysis techniques to a sample of red mud - a by-product of the Bayer process - for magnetic separation”, *Thermochimica Acta*, n. 254, pp. 337-345, 1995.
- [75] PRADHAN, J., DAS, S. N., DAS, J., RAO, S. B., THAKUR, R.S., “Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values”, *Light Metals*, pp. 87-92, 1996.
- [76] PURNELL, B.G., “Mud disposal at the burntisland alumina plant”, (2004).
- [77] REESE, K. M., CUNDIFF, W. H. “In Aluminum production the first stage is Alumina”, *Industrial and Engineering Chemistry*. v. 47. n. 9, pp. 1672-1680, 1955.
- [78] RODRIGUEZ, M., “Fenton and UV-vis based advanced oxidation processes in wastewater treatment: Degradation, mineralization and biodegradability enhancement”, Tese Dr., Universitat de Barcelona. Facultat de Química, Barcelona, 2003.
- [79] RONDON, J. R., “Soda cáustica vaza e atinge rio em SP, <http://www.folha.com.br/noticia>”, Agência Folha 28/07/2004 – 03h 13. Acessado em julho de 2004.
- [80] SALOPEK, S., STRAZISAR, J., “The Influence of red mud impoundments on the environment”, *Light Metals*, pp. 41-44, 1993.
- [81] SANTORA, L., CASTALDI, P., MELIS, P., “Evaluation of the interaction mechanisms between red muds and heavy metals”, *Journal of Hazardous Materials*, 2006.
- [82] SGLAVO, V. M., MAURINA, S., CAMPOSTRINI, R., MONAGHEDDU, M., BUDRONI, G., CARTURAN, G. COCCO, G., “Bautite “red mud” in the ceramic industry. Part 1: thermal behavior”, *Journal of the European Ceramic Society*, n. 20, pp. 325-244, 2000a.
- [83] SGLAVO, V. M., MAURINA, S., CONCI, A., SALVIATI, A., CARTURAN, G. COCCO, G., “Bautite “red mud” in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics”, *Journal of the European Ceramic Society*, 20, pp. 245-252, 2000b.
- [84] SHIMANO, S., KOGA, T., “Utilization of red mud as raw material for the cement industry”. *Light Metals*, pp.53-68, 1979.
- [85] SILVA FILHO, E. B., BRANDER JUNIOR, W., SILVA, V. L., MOTTA SOBRINHO, M. A., ALVES, M. C. M., “Tratamento de efluentes têxteis por adsorção em lama vermelha”, In: *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande, Mato Grosso, Brasil, 2005.
- [86] SILVA FILHO, E. B., OLIVEIRA, E. H. C., SILVA, V. L., MOTTA SOBRINHO, M. A., ALVES, M. C. M., “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.
- [87] SINGH, M., GARG, M., “Study on anhydrite plaster from waste phosphogypsum for use in polymerized flooring composition”, *Construction and Building Materials*, n. 19, pp. 25-29, 2005.

- [88] SINGH, M, UPADHAYAY, S. N., PRASAD, P. M., “Preparation of iron rich cements using red mud”, *Cement and Concrete Research*, v. 27, n 7, pp.1037-1046, 1997.
- [89] SOFRÁ, F., BOGER, D. V., “Environmental rheology for waste minimization in the minerals industry”, *Chemical Engineering Journal*, n. 8, pp. 319-330, 2002.
- [90] SUJANA, M. G., THAKUR, R. S., ACHARYA, B.C., DAS, S.N., RAO, S.B., “Effect of calcination and physico-chemical properties of red mud”, *Light Metals*, 1996.
- [91] SUMMERS, R. N., RIVERS. M. R., CLARKE, M. F., “The use of bauxite residue to control diffuse phosphorus pollution in Western Australia: a win-win-win outcome”, In: *6th International Alumina Quality Workshop*, pp. 262-269, Brisbane. Australia, 2002.
- [92] TAN, R., KHOO, H. H., “An LCA study of a primary aluminum supply chain”, *Journal of Cleaner Production*, n.13, pp. 617-618, 2005.
- [93] TSAKIRIDIS, P. E., AGATZINI-LEONARDOU, S., OUSTAKADIS, P., “Red mud addition in the raw meal for the production of cement portland clinker”, *Journal of Hazardous Materials B116*, pp. 103-110, 2004.
- [94] USGSMRP - United States Geological Survey Mineral Resources Program, http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/bauxite_and_alumina/bauxite_and_alumina_table12.html. Acessado em julho de 2006.
- [95] UWINONA, <http://wwwchem.uwimona.edu.jm:1104/lectures/bauxite.html>, Acessado em outubro de 2005.
- [96] VAN DER LAAN, S. R., VAN VLIET, A., “A concise analytical strategy applied to waste treatment technology”, *Journal of Geochemical Exploration*, n. 62, pp. 105–127, 1998.
- [97] VICK, S. G., *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*, United States of America, 1983.
- [98] WANG, S., BOYJOO, Y., CHOUEIB, A., ZHU, Z. H., “Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud”, *Water Research*, n 39, pp. 129-138, 2005.
- [99] WILLS, B. A., *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of ore Treatment and Mineral Recovery*, 6 ed., Butterworth Heinemann, 1997.
- [100] WAO – World Aluminium Organization, <http://www.world-aluminium.org>. Acessado em abril de 2003.
- [101] YALÇIN, N., SEVINÇ, V., “Utilization of bauxite waste in ceramic glazes”, *Ceramics International*, n 26, pp. 485-493, 2000.
- [102] YANIK, J., UDDINB, M. A., IKEUCHIB, K., SAKATAB Y., “The Catalytic Effect of Red Mud on the Degradation of poly(vinyl chloride) Containing Polymer Mixture into Fuel Oil”, *Polymer Degradation and Stability*, n. 73, pp. 335–346, 2001.