

### III-470 - EFICIÊNCIA DA ATENUAÇÃO E BALANÇO DE MASSA DE CONTAMINANTES PRESENTES EM RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS PERIGOSOS

**André Luiz Fiquene de Brito<sup>(1)</sup>**

Professor do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba. Graduado em Química pela UFPB. Especialista em Agentes de Inovação Tecnológica pela UFPB. Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento pela UFPB/UEPB. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

**Amanda de Paula Ramos**

Engenheira Química pela Universidade Federal de Campina Grande(UFCG). Mestre em Engenharia Química pela UFCG. Doutoranda em Engenharia Química pela UFCG.

**Ana Cristina Silva Muniz**

Química pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento pela UFPB/UEPB. Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Professora da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

**Maria Janaína de Oliveira**

Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba. Mestre em Engenharia Química pela UFCG. Professora Substituta da Universidade Estadual da Paraíba, lotada no Campus - I, CCT – DQ.

**André Luiz Muniz Brito**

Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba - UEPB – Universidade Estadual da Paraíba.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Aprígio Veloso, 882. Bodocongó – Campina Grande - PB - CEP: 58109-970 - Brasil - Tel: (31) 2101 – 1115 – R - 24 - e-mail: [andre@deq.ufcg.edu.br](mailto:andre@deq.ufcg.edu.br)

#### RESUMO

Atualmente tem sido utilizada a estabilização por solidificação para tratar resíduos sólidos industriais perigosos classe I. Com a estabilização por solidificação o resíduo Classe I(perigoso) é convertido para a classe II A ou II B (não perigoso). Constata-se que a eficiência e o balanço de massa tem sido pouco utilizado após a estabilização por solidificação. O trabalho tem por objetivo principal avaliar a eficiência da atenuação e realizar o balanço de massa de contaminantes de resíduos sólidos perigosos incorporados em matrizes de cimento. O trabalho usou como resíduos perigosos a borra oleosa de petróleo(orgânico) e o resíduo sólido sintético(inorgânico) e como aglomerante cimento Portland simples. O trabalho foi dividido em quatro etapas. Na primeira etapa foi realizada a caracterização dos resíduos perigosos. Na segunda etapa foi realizada a confecção dos corpos de provas. Na terceira etapa foi realizada a estabilização por solidificação e na quarta etapa o balanço de massa e a eficiência do processo de estabilização por solidificação. Os resultados mostraram que houve atenuação do chumbo presente na massa do resíduo sólido sintético e no teor de óleo presente na borra oleosa de petróleo. A eficiência de retenção dos contaminantes foi influenciada pela massa de aglomerante usado(cimento) e pela quantidade de contaminante(borra e resíduo). Finalmente, concluiu-se que se deve calcular a eficiência do processo de estabilização por solidificação considerando as massas do aglomerante e do contaminante. O balanço de massa realizado no resíduo sólido sintético (RSS) e da borra oleosa de petróleo mostrou que a massa de contaminante foi atenuada (reduzida), indicando que na disposição dos materiais E/S, os contaminantes poderão causar menor impacto ambiental. Com relação à borra oleosa pode-se dizer que o tratamento com sete dias de cura e 20% de borra oleosa foi o tratamento que obteve maior eficiência (95,73%) e a maior atenuação (13,37g) da borra, indicando que houve tratamento e não uma diluição do resíduo na massa do aglomerante.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solidificação, Estabilização, Retenção, Balanço, Resíduo Sólido.

#### INTRODUÇÃO

As maiorias dos processos industriais geram grande quantidade e diversidade de resíduos sólidos. Os resíduos sólidos industriais são potencialmente tóxicos e contribuem para a degradação do meio ambiente quando dispostos inadequadamente e sem tratamento.

A estabilização por solidificação (E/S) constitui, atualmente, um processo muito utilizado em diversos países, para o tratamento de diferentes tipos de resíduos sólidos, entre os quais se destacam os resíduos sólidos oleosos da indústria petrolífera com concentrações significativas de metais pesados, compostos orgânicos voláteis e óleos e graxas. Para tratar esses resíduos perigosos, a estabilização por solidificação pode ser empregada como uma opção de pré-tratamento ou tratamento propriamente dito. O processo é utilizado quando estes resíduos não podem ser eliminados, reduzidos, reciclados ou utilizados no ambiente de origem.

Dois aspectos Justificam a realização deste trabalho, no que se refere à avaliação do material estabilizado e solidificado.

O primeiro refere-se à falta da realização do balanço de massa após a estabilização por solidificação (E/S). No processo de E/S uma matriz sólida retém os contaminantes no interior da mesma. Outra parte dos contaminantes são lixiviadas (não retidas). Neste caso, com o balanço de massa proposto e realizado neste trabalho foi possível quantificar a quantidade de contaminante que não foi retida e que possivelmente poderá causar impacto negativo ao meio ambiente.

O segundo aspecto refere-se à forma inadequada de determinar a eficiência de retenção do processo de E/S. Tem-se constatado que no cálculo da eficiência de retenção têm sido usado apenas as concentrações iniciais e finais dos contaminantes. Neste trabalho, utilizaram-se, além, das concentrações iniciais e finais dos contaminantes as massas dos aglomerantes(cimento) e as massas dos contaminantes. Com isso determinou-se realmente a eficiência do tratamento, evitando o erro de apenas diluir o contaminante na matriz de cimento.

O trabalho tem por objetivo principal avaliar a eficiência da atenuação e realizar o balanço de massa de contaminantes de resíduos sólidos perigosos incorporados em matrizes de cimento.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos – LABGER (<https://sites.google.com/site/labgerufcg/>), pertencente a Universidade Federal de Campina Grande – PB, na Unidade Acadêmica de Engenharia Química – UAEQ.

Este trabalho utilizou como aglomerante o Cimento Portland Comum F 32. Quanto aos contaminantes foram usados: Borra oleosa de Petróleo (BOP) e Resíduo Sólido Sintético (RSS). O objetivo de utilizar estes contaminantes foi devido aos mesmos apresentarem características orgânicas e inorgânicas e só assim verificar a eficiência de atenuação frente aos dois tipos de contaminantes.

O trabalho foi dividido em quatro etapas:

### *Primeira Etapa: Planejamento do Experimento e Análise Estatística*

Na primeira etapa foi realizado o planejamento dos experimentos. O planejamento fatorial foi aplicado para investigar as influências de todas as variáveis experimentais e os efeitos de interação entre elas sobre a resposta analítica (MINITAB, 2014; MONTGOMERY, D.C; RUNGER, 2003; MONTGOMERY, 1996).

### *Planejamento: Borra oleosa de Petróleo*

Foi adotado um fatorial  $2^2$  com três pontos centrais. Foram adotados os fatores percentagem (%) de borra de petróleo (10,15% e 20%) e tempo de cura (7, 14 e 28 dias). A partir do planejamento, identificaram-se as melhores respostas dos fatores e foi realizada a otimização do processo.

### *Planejamento: Resíduo Sólido Sintético – Inorgânico (RSS)*

O planejamento experimental adotado foi o fatorial  $2^k$  com duas repetições, objetivando analisar os efeitos de dois tipos de fatores no experimento, com duas réplicas. Nesse planejamento foram estudados dois fatores. Os fatores adotados foram percentagem de resíduo sólido sintético (20% e 40%) e o tempo de cura da matriz sólida (14 dias e 28 dias), com seus respectivos níveis baixo (-1) e alto (+1).

### *Segundo Etapa: Confeção dos Corpos de Provas*

Os corpos de prova foram preparados utilizando-se o cimento (aglomerante) e a borra oleosa do petróleo (contaminante). A Tabela 1 mostra os aspectos operacionais para confeccionar os corpos de provas.

**Tabela 1 - Aspectos Operacionais**

Aspectos Operacionais	Parâmetros
Tempo de preparação das amostras	28 dias
Formato do molde	Cilíndrico
Dimensão do molde	5 cm de diâmetro e 10 cm de altura
Tempo de moldagem	24 horas
Umidade relativa do laboratório	50 a 100%
Temperatura do laboratório	24 ± 4 °C

A Figura 1 mostra a sequência de preparação dos corpos de prova (que foram confeccionados com borra oleosa de petróleo e resíduo sólido sintético).

**Figura 1 – Confeção dos corpos de prova**



Os corpos de prova foram preparados seguindo as seguintes etapas:

- O aglomerante e os contaminantes foram pesados em uma balança analítica com precisão de 0,01 g. O aglomerante e contaminante foram bem misturados, e em seguida, postos em contato com a água. A partir do contato do aglomerante com água iniciou-se a contagem do tempo de preparação dos corpos de provas (Fig 1 a e 1b);
- Uma placa de vidro de 70 mm por 70 mm de aresta e de 5 mm de espessura, também, foi lubrificada com óleo mineral, foi colocada na superfície do molde, para evitar perda de água (Figura 1 c);
- O material ficou em repouso por um período de 24 horas para endurecimento da pasta. Após este período, o corpo de prova foi retirado do molde e deixado por um período de 7, 14 ou 28 dias de preparação da amostra, e finalmente foram realizados os ensaios referentes aos critérios de avaliação de materiais (Fig. 1 d).

### *Terceira Etapa: Avaliação dos Materiais Estabilizados por Solidificação*

Para a avaliação da imobilização dos contaminantes, foram empregados os ensaios de lixiviação e solubilização propostos respectivamente pelas normas ABNT NBR 10.005 (ABNT, 2004<sub>a</sub>); ABNT NBR

10.005 (ABNT, 2004<sub>b</sub>) e ABNT NBR 10.006 (ABNT, 2004<sub>c</sub>). Nos ensaios de lixiviação e solubilização, foram pesadas amostras representativas de 100 e 250 gramas do corpo de prova.

No ensaio de lixiviação, as amostras foram colocadas em frascos com tampas rosqueáveis, juntamente com 2000 mL de água destilada, ou seja, numa relação líquido – sólido (L/S) igual a 20:1, além da solução lixiviante (ácido acético glacial e água destilada). Quanto ao ensaio de solubilização, ele se caracteriza por usar amostra triturada, numa relação L/S igual a 4:1 e repouso por sete dias a temperatura ambiente. No ensaio, amostras de 100 gramas de corpo de prova foram colocadas em frascos plásticos de 1000 mL.

#### ***Quarta Etapa: Avaliação da Eficiência de Retenção e Balanço de Massa***

##### ***Avaliação da Eficiência de Retenção***

A eficiência de retenção dos contaminantes foi determinada em função da massa de concentração do resíduo (borra oleosa de petróleo) e aglomerante, conforme a expressão (1) que determina a eficiência de retenção em função das massas do aglomerante e da borra oleosa e dos resíduos sólidos sintéticos (BRITO, 2007):

$$\text{Eficiência de retenção (\%)} = \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\text{Contaminante}}{\text{Aglom}} \right) \times \frac{[y]\text{Tratado}}{[z]\text{Bruto}} \right] \times 100 \quad (1)$$

O uso da expressão (1) tem o objetivo de avaliar e comparar se as massas dos agentes influenciam na eficiência de retenção dos contaminantes. Onde:

- Contaminante: Massa do resíduo (kg);
- Aglom: Massa do aglomerante (kg);
- [y]: Concentração do lixiviado/solubilizado tratado (mg.kg<sup>-1</sup>);
- [z]: Concentração do lixiviado/solubilizado bruto (mg.kg<sup>-1</sup>).

O objetivo será avaliar e comparar se as massas dos agentes influenciam na eficiência de retenção dos contaminantes.

O resultado da Expressão 1 foi comparado com o resultado da expressão 2 que considera, apenas, a concentração do extrato no lixiviado/solubilizado no resíduo bruto e tratado.

$$[X]_{\text{Eficiência. Retenção (\%)}} = \frac{[z]\text{Bruto} - [y]\text{Tratado}}{[z]\text{Bruto}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

- [x] : Eficiência de retenção (%);
- RS : Massa do lodo de ETE (kg),
- Aglom : Massa total do aglomerante (kg),
- [y] Tratado : Concentração do extrato lixiviado/solubilizado do material tratado (mg.kg<sup>-1</sup>),
- [Z] Bruto : Concentração do extrato lixiviado/solubilizado do resíduo bruto (mg.kg<sup>-1</sup>).

##### ***Balanço de Massa***

O balanço de massa foi realizado para determinar a atenuação em cada tratamento após a E/S em termos da massa de aplicação, lixiviação e acumulação da borra oleosa de petróleo (BRITO, 1999).

O balanço de massa foi calculado aplicando a Equação x para os tratamentos utilizados na E/S:

$$\text{Massa (Atenuada)} = \text{Massa (Aplicada)} - \text{Massa (Lixiviada)} \quad (3)$$

Em que:

- Massa (atenuada): massa em gramas, retida pelo corpo de prova ou atenuada após a E/S;
- Massa (aplicada): massa em gramas, aplicada no corpo de prova ou aplicada antes da E/S;
- Massa (lixiviada): massa em gramas não retida pelo corpo de prova ou não fixada após a E/S.

## RESULTADOS e DISCUSSÕES

### Avaliação da Eficiência de Retenção no Resíduo Sólido Sintético - RSS

A Tabela 2 mostra a eficiência de retenção do chumbo e as composições das massas do RSS e do aglomerante (Cimento Portland), além da concentração do lixiviado do material bruto e tratado por E/S. A eficiência foi calculada a partir da expressão 1.

Ressalta-se que essa expressão considera as massas do RS e do aglomerante, a concentração do resíduo bruto e a concentração do tratamento a ser avaliado. É importante, pois avalia a retenção do contaminante em função das massas e concentrações dos tratamentos. É um indicativo de que houve tratamento e não a diluição do RSS na massa aglomerante.

Tabela 1 – Eficiência de Retenção Para o Chumbo – Expressão 1

Tratamento	Massa de RSS (g)	Massa de Aglomerante(g)	[Pb <sup>2+</sup> ] Bruto (mg.kg <sup>-1</sup> )	[Pb <sup>2+</sup> ] Tratado (mg.kg <sup>-1</sup> )	% E <sub>eficiência</sub>
CP <sub>1</sub> t=14 dias e 20%RS	66,31	264,35	29840	11,76	99,95
CP <sub>2</sub> t=28 dias e 20%RS	66,10	264,17	29840	09,17	99,96
CP <sub>3</sub> t=14 dias e 40%RS	140,26	210,18	29840	15,16	99,90
CP <sub>4</sub> t=28 dias e 20%RS	140,32	210,26	29840	10,98	99,93

CP<sub>1</sub> t=14 dias e 20%RS; CP<sub>2</sub> t=28 dias e 20%RS; CP<sub>3</sub> t=14 dias e 40%RS; CP<sub>4</sub> t=28 dias e 20%RS

A Tabela 3 mostra a eficiência de retenção do chumbo e as composições das massas do RSS e do aglomerante (Cimento Portland), a partir da expressão 2.

Tabela 3 – Eficiência de Retenção Para o Chumbo– Expressão 2

Tratamento	[Pb <sup>2+</sup> ] Bruto (mg.kg <sup>-1</sup> )	[Pb <sup>2+</sup> ] Tratado (mg.kg <sup>-1</sup> )	% E <sub>eficiência</sub>
CP <sub>1</sub> t=14 dias e 20%RS	29840	11,76	99,96
CP <sub>2</sub> t=28 dias e 20%RS	29840	09,17	99,96
CP <sub>3</sub> t=14 dias e 40%RS	29840	15,16	99,95
CP <sub>4</sub> t=28 dias e 20%RS	29840	10,98	99,96

CP<sub>1</sub> t=14 dias e 20%RS; CP<sub>2</sub> t=28 dias e 20%RS; CP<sub>3</sub> t=14 dias e 40%RS; CP<sub>4</sub> t=28 dias e 20%RS

Comparando as eficiências de atenuação usando a expressão 1 com a expressão 2, observa-se que os valores da eficiência usando a expressão 2 (não considera as massas dos cimento e do resíduo) apresentam valores maiores quando comparado com a expressão 1 (considera as massas dos cimento e do resíduo).

Observa-se uma diminuição significativa na lixiviação do chumbo após a E/S. Sabe-se que o chumbo apresenta caráter anfótero. Ele é insolúvel na forma de hidróxido no intervalo de 7 a 11.

Com base nos valores obtidos para o pH dos extratos lixiviados, dos 4 tratamentos os quais variaram entre 11, 56-11, 18, (valores bem próximos de 11), no qual o chumbo é insolúvel é possível afirmar que o metal sofreu durante o processo de E/S, o mecanismo de precipitação de seu hidróxido, o que justificaria as baixas concentrações desse metal no extrato lixiviado e a elevada eficiência do processo.

Estudos anteriores mostram que o pH dos lixiviados é o principal fator de controle para lixiviabilidade do chumbo. Baixas concentrações de chumbo são observados no intervalo de pH neutro e de básico. Alterações nas concentrações de Pb(Chumbo) aumentam a quando o pH varia para um valor extremamente baixo ou alto.



Este comportamento anfotérico é a consequência do fenômeno de solubilização na interface sólido-líquido da matriz.

No presente trabalho, entretanto, ao que tudo indica o chumbo foi retido na parte interna da matriz cimentícia, pois se estivesse presente na superfície externa da matriz, teria sido extraído com facilidade. Trabalho recente pelo grupo de pesquisa, através de testes de lixiviação utilizando chumbo no processo de E/S, concluiu-se que houve diminuição na concentração desse metal, em relação aos valores esperados, revelando que o chumbo sofreu algum mecanismo de imobilização efetivo na matriz de cimento. Possivelmente o metal deve ter sofrido um mecanismo de aprisionamento físico, sendo envolvido pelas complexas redes de silicato de cálcio hidratado (CSH), ou formação de ligação química em regiões específicas desse composto.

#### *Avaliação da Eficiência de Retenção de Óleos e Graxas na Borra Oleosa de Petróleo (BOP)*

A Tabela 4 mostra a eficiência de retenção de óleos e graxas na borra oleosa e as composições das massas de resíduo e aglomerante (cimento Portland), além da concentração do lixiviado do material bruto e tratado por E/S. A eficiência foi calculada a partir da expressão 1.

Ressalta-se que essa expressão considera as massas da BOP e do aglomerante, a concentração do resíduo bruto e a concentração do tratamento a ser avaliado.

**Tabela 4 – Eficiência de Retenção do Teor de O&G – Expressão 1**

Tratamentos	Massa de Borra (g)	Aglomerante (g)	O&G (mg.kg <sup>-1</sup> ) Borra Bruta	O&G (mg.kg <sup>-1</sup> ) (Lixiviada)	% Eficiência
<b>T01</b> <sub>t=7dias e 10%RS</sub>	30,0	300	382,4	13,67	95,28
<b>T02</b> <sub>t=7dias e 20%RS</sub>	60,0	300	382,4	5,67	95,73
<b>T03</b> <sub>t=28dias e 10%RS</sub>	30,0	300	382,4	16,67	94,25
<b>T04</b> <sub>t=28dias e 20%RS</sub>	60,0	300	382,4	24,17	81,80
<b>T05</b> <sub>t=14dias e 15%RS</sub>	45,0	300	382,4	10,36	94,39
<b>T06</b> <sub>t=14dias e 15%RS</sub>	45,0	300	382,4	9,91	94,63
<b>T07</b> <sub>t=14dias e 15%RS</sub>	45,0	300	382,4	8,57	95,36

A Tabela 5 mostra a eficiência de retenção do chumbo e as composições das massas do RSS e do aglomerante (Cimento Portland), a partir da expressão 2.

**Tabela 5 – Eficiência de Retenção do Teor de O&G – Expressão 2**

Tratamentos	OeG (mg.kg <sup>-1</sup> ) Borra Bruta	OeG (mg.kg <sup>-1</sup> ) (Lixiviada)	% Eficiência
<b>T01</b> <sub>t=7dias e 10%RS</sub>	382,4	13,67	95,18
<b>T02</b> <sub>t=7dias e 20%RS</sub>	382,4	5,67	98,52
<b>T03</b> <sub>t=28dias e 10%RS</sub>	382,4	16,67	95,64
<b>T04</b> <sub>t=28dias e 20%RS</sub>	382,4	24,17	93,67
<b>T05</b> <sub>t=14dias e 15%RS</sub>	382,4	10,36	97,29
<b>T06</b> <sub>t=14dias e 15%RS</sub>	382,4	9,91	97,43
<b>T07</b> <sub>t=14dias e 15%RS</sub>	382,4	8,57	97,75

Comparando as eficiências de atenuação usando a expressão 1 com a expressão 2, observa-se que os valores da eficiência usando a expressão 2 (não considera as massas do cimento e do resíduo) apresentam valores maiores quando comparado com a expressão 1 (considera as massas do cimento e do resíduo). Na Tabela 4, a eficiência do tratamento **T04**<sub>(t=28dias e 20%RS)</sub> foi 81,80% (usando a Expressão 1), enquanto que na Tabela 5 a eficiência do mesmo tratamento (**T04**) foi 93,67% (usando a Expressão 2).

Portanto, comparando as eficiências das Tabelas 4 e 5, verifica-se que quando se calcula a eficiência do tratamento sem levar em consideração as massas do cimento e do resíduo (Tabela 5 e expressão 2):

1. Pode-se omitir a real eficiência do processo, tratamento ou da atenuação do contaminante;

2. Pode-se não realizar o tratamento do resíduo e sim diluir o resíduo na massa de cimento, mascarando o tratamento e apenas diluindo o contaminante no aglomerante.

Observa-se uma diminuição significativa na lixiviação de Óleos e Graxas após a E/S, acima de 80%, comparando-se com a borra bruta, sem tratamento ( $382,40 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ).

O tratamento T<sub>02</sub> obteve o maior percentual de eficiência de retenção (95,73%). O Tratamento T<sub>07</sub> também obteve um percentual significativo de retenção (95,36%). Nesses dois tratamentos, T<sub>02</sub> e T<sub>07</sub>, foram utilizados os menores percentuais de borra oleosa na confecção dos corpos de prova. Essa observação é importante para que se chegue a uma proporção ideal na mistura entre resíduo e aglomerante nos materiais E/S encaminhados às diferentes rotas de destinação final.

Observa-se a influência das massas dos agentes de solidificação utilizados para estabilizar e solidificar os contaminantes. Foi comprovado que na medida em que se aumentou a massa do resíduo, a eficiência de retenção diminuiu.

#### **Balanço de Massa: Resíduos Sólidos Sintético - RSS**

O balanço de massa foi aplicado a todos os 4 tratamentos. De acordo Brito (1999), conhecendo-se a massa aplicada e a massa atenuada, determina-se a massa lixiviada. Para o cálculo do balanço de massa do RSS, utilizou-se a expressão (3). Os valores das massas aplicadas, atenuadas e lixiviadas nos tratamentos estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Balanço de massa para os quatro tratamentos**

Tratamentos	M <sub>a</sub> Pb <sup>2+</sup> (mg)	M <sub>L</sub> Pb <sup>2+</sup> (mg)	M <sub>at</sub> Pb <sup>2+</sup> (mg)
CP <sub>1</sub> t=14 dias e 20%RS	2980,12	4,20	2975,92
CP <sub>2</sub> t=28 dias e 20%RS	2980,12	3,25	2976,87
CP <sub>3</sub> t=14 dias e 40%RS	2980,12	5,49	2974,63
CP <sub>4</sub> t=28 dias e 20%RS	2980,12	3,68	2976,44

LEGENDA: M<sub>a</sub>= massa aplicada, M<sub>L</sub>= massa lixiviada e M<sub>at</sub>= massa atenuada.

Na Tabela 6, os resultados obtidos para atenuação do contaminante foram todos semelhantes. A maior atenuação ocorreu para o tratamento CP2 (20% RSS e 28 dias de cura, onde foram atenuados 2976,87 mg do metal em função das massas aplicadas e lixiviadas. O valor atenuado pode ser considerado satisfatório, pois, o chumbo é um metal altamente perigoso e a sua atenuação é fator decisivo para disposição e gerenciamento adequado.

Segundo Jing et al., (2004), o chumbo é o contaminante mais comum no meio ambiente e tem toxicidade crônica. Contaminação por chumbo foi encontrado em 604 locais de um total de 1221 locais do projeto ambiental SUPERFUND (NPL) nos EUA.

O valor igual a 2980,12 mg de Pb<sup>2+</sup> encontrado neste trabalho refere-se a massa do metal que foi tratada. Deste total, para o tratamento CP2, 2976,87 mg foi retida na matriz de cimento e apenas 3,25 mg foi lixiviada.

O cimento utilizado neste trabalho, Portland tipo II F-32, tem na sua composição, material carbonáceo (6-10%) podendo assim melhorar as propriedades mecânicas e aumentar a capacidade de retenção de contaminantes nas matrizes cimentícias (LANGE *et al.*, 1998).

Através do processo de E/S foi possível converter o resíduo perigoso Classe I para Classe II, não perigoso. Esta nova classificação pode contribuir para diminuição dos impactos ambientais desse metal, bem como, minimizar os custos para disposição para as indústrias.

#### **Balanço de Massa: Borra Oleosa de Petróleo**

Para o cálculo do balanço de massa de Óleos e Graxas, utilizou-se também a expressão 3. Os valores das massas aplicadas, atenuadas e lixiviadas nos tratamentos estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Balanço de massa para os tratamentos**

Tratamento	$M_{a \text{ Borra}} \text{ (g)}$	$M_{L \text{ Borra}} \text{ (g)}$	$M_{at \text{ Borra}} \text{ (g)}$
<b>T01</b> $t=7$ dias e 10% RS	12,6192	0,526	12,09
<b>T02</b> $t=7$ dias e 20% RS	13,7664	0,400	13,37
<b>T03</b> $t=28$ dias e 10% RS	12,6192	0,614	12,01
<b>T04</b> $t=28$ dias e 20% RS	13,7664	1,731	12,03
<b>T05</b> $t=14$ dias e 15% RS	13,1928	0,584	12,60
<b>T06</b> $t=14$ dias e 15% RS	13,1928	0,563	12,63
<b>T07</b> $t=14$ dias e 15% RS	13,1928	0,479	12,71

LEGENDA:  $M_{a \text{ Borra}}$ : massa aplicada,  $M_{L \text{ Borra}}$ : massa lixiviada e  $M_{at \text{ Borra}}$ : massa atenuada.

Na Tabela 7, a maior atenuação foi para o tratamento T02 ( $t=7$  dias e 20% RS), onde foram atenuados 13,37 g de contaminantes, em função das massas aplicadas e lixiviada. O valor atenuado pode ser considerado satisfatório, pois, a borra oleosa é um material altamente perigoso e a sua atenuação é fator decisivo para disposição e gerenciamento adequado.

O valor igual a 13,7664 g de massa de borra significa a massa de borra a ser tratada. Deste total, 13,37 g está retida na matriz de cimento e apenas 0,4 g foi lixiviada, ou seja, não está retida na matriz. Para este tratamento a concentração de O&G foi de  $5,67 \text{ mg.L}^{-1}$ , valor abaixo do LMP que é  $20 \text{ mg.L}^{-1}$  (lançamento de óleos em corpos de água).

O uso do cimento colabora para a retenção da BOP na matriz cimentícia. O cimento utilizado, Portland tipo II F-32, tem na sua composição, material carbonáceo (6-10%) podendo assim melhorar as propriedades mecânicas e aumentar a capacidade de retenção de contaminantes no cimento (LANGE & SCHWABE, 1997). A partir do uso dessa característica do cimento, obteve-se a atenuação esperada dos contaminantes presentes na borra oleosa de petróleo.

Através da tecnologia de E/S, foi possível converter a borra oleosa de petróleo Classe I para Classe II, não perigoso. Essa nova classificação pode contribuir para minimizar custos de disposição de resíduos da indústria petrolífera.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

1. O resíduo sólido sintético classificado como perigoso Classe I foi convertido em um material não perigoso Classe II, após o tratamento de estabilização por solidificação, já que a magnitude de metal pesado inicial de  $29840 \text{ mg.kg}^{-1}$  de chumbo passou para um valor médio de  $9,17 \text{ mg.kg}^{-1}$  de chumbo para as matrizes curadas por 28 dias e incorporado 20% de RSS, mostrando que o processo de estabilização/solidificação apresenta-se como alternativa de tratamento eficaz para imobilização de contaminantes.
2. O processo de E/S utilizando Cimento Portland Comum revelou-se muito eficiente na imobilização do chumbo presente no resíduo sólido sintético (RSS).
3. O balanço de massa realizado no resíduo sólido sintético (RSS) e da borra oleosa de petróleo mostrou que a massa de contaminante foi atenuada (reduzida), indicando que na disposição dos materiais E/S, os contaminantes poderão causar menor impacto ambiental.
4. Com relação a borra oleosa pode-se dizer que o tratamento com 7 dias de cura e 20% de borra oleosa foi o que obteve maior eficiência (95,73%) e a maior atenuação (13,37g) da borra, indicando que houve tratamento e não uma diluição do resíduo na massa do aglomerante.
5. Finalmente, conclui-se que a eficiência de retenção deve ser calculada usando a expressão em que as massas do aglomerante (cimento ou argila) e do resíduo perigoso (resíduo contendo contaminantes) são levadas em consideração.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10.004: **Resíduos Sólidos - Classificação**. CENWin, Versão Digital, ABNT NBR 10.004, 71p, 2004a.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10.005: **Procedimentos para obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos**. CENWin, Versão Digital, 16p, 2004b.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10.006: **Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. CENWin, Versão Digital, 3p, 2004c.
4. BRITO, A. L. F. **Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização por Solidificação**. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, 2007.
5. BRITO, A. L. F. **Codisposição de resíduos sólidos urbanos e resíduos sólidos de indústria de curtume**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba - UFPB e Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, Campina Grande - PB, 1999.
6. JING, C.; MENG, X.; KORFIATIS, G.P. Lead leachability in stabilized/solidified soil samples evaluated with different leaching tests. *Journal of Hazardous Materials* B114,p 101-110,2004.
7. LANGE, L.; SCHWABE, W.; HILLS, C.D. **A tecnologia da estabilização/solidificação aplicada ao tratamento de resíduos industriais**. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.3. n.1, p.55-66, 1998.
8. LANGE, L.; SCHWABE, W. **Estudo dos efeitos da carbonatação acelerada nas propriedades físico-químicas de resíduos galvânicos solidificados em matrizes de cimento**. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20, 1997, Rio de Janeiro: ABES, 1997. CD-ROM.
9. MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e probabilidade para Engenheiros**. 2<sup>a</sup> Ed. LTC Editora. São Paulo, 2003, 463p.
10. MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 4<sup>a</sup> ed. John Wiley e Sons, Inc. New York, 1996, 703p.
11. MINITAB. **Software Estatístico**, versão 17.0. 2014.