



II-185 - REMOÇÃO DE CHUMBO E VANÁDIO DE EFLUENTE INDUSTRIAL COM A UTILIZAÇÃO DO PÓ DE SERRA DE *Pinus sylvestris*

Fábio Kaczala⁽¹⁾

Bolsista CAPES de doutorado pleno no Exterior em Engenharia Ambiental na University of Kalmar, Kalmar, Suécia. Engenheiro Civil-Ênfase em Engenharia Sanitária pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ, MSc em Saúde Pública pela Escola Nacional de Saúde Pública-ENSP/FIOCRUZ Membro do Grupo de Pesquisa *BioProcess*.

Marcia Marques

Marcia Marques (Gomes) é Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ. BSc e MSc em Biologia (Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ), PhD em Engenharia Química pelo Royal Institute of Technology (Estocolmo), Docente pela Chalmers Technical University e Pós-Doutorado pela University of Kalmar, Suécia. Orienta alunos de iniciação científica, especialização, mestrado e doutorado e é Líder do Grupo de Pesquisa *BioProcess*.

William Hogland

Prof. Titular de Engenharia Ambiental e Reciclagem da University of Kalmar, Suécia. Engenheiro Civil, MSc em Engenharia Civil e DSc em Engenharia de Recursos Hídricos pela Lund University, Suécia. Desenvolve pesquisas em sistemas de tratamento de chorume, recuperação energética a partir de resíduos sólidos, tratamento de águas residuárias industriais e aspectos econômicos de gerenciamento de resíduos sólidos. Membro do Grupo de Pesquisa *BioProcess* UERJ/CNPq.

Endereço⁽¹⁾: Landgängen 3, Kalmar. SE 39182. Suécia. Tel: + 46 (480) 44 6334. e-mail: fabio.kaczala@hik.se

RESUMO

O presente estudo consistiu em avaliar a viabilidade da utilização do pó de serra de *Pinus sylvestris* após um processo de decantação/sedimentação para a remoção de Vanádio (V) e Chumbo (Pb) presentes no efluente industrial de uma indústria de pisos laminados de madeira. Os efeitos de diferentes quantidades de adsorvente, do pH inicial e do tempo de contato entre adsorvente-adsorvato foi investigado. Fez parte do experimento o acompanhamento da dinâmica de pH ao longo dos testes de adsorção, juntamente com um estudo em paralelo do potencial de lixiviação de metais através do contato do pó de serra com água destilada. Durante os experimentos foi observada uma influência do pH inicial na eficiência de remoção de Pb e V. Ao reduzir o pH inicial de 7,4 para 4,0 a eficiência de adsorção subiu de 32% para 99% no caso do Pb e de 43% para 95% no caso do V. O presente estudo também mostrou que enquanto a remoção de V apresentou correlação positiva, a remoção de Pb apresentou correlação negativa com as doses de adsorvente testadas. Tal fenômeno pode estar correlacionado com a liberação de Pb presente no pó de serra, fato corroborado pelos testes de lixiviação em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: adsorção; metais tóxicos; adsorventes “não convencionais”; pó de serra.

INTRODUÇÃO

O lançamento de efluentes industriais com a presença de compostos químicos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública, como metais tóxicos, resulta em impactos significativos. Embora a toxicidade de alguns compostos já sejam conhecidos há algumas décadas, ainda existem diversos compostos que necessitam de investigações mais detalhadas com relação aos seus efeitos tóxicos. É sabido, por exemplo que o Chumbo (Pb) - metal que pode ser transferido ao organismo humano através do fenômeno bioacumulação na cadeia alimentar - causa distúrbios no sistema nervoso central, no sistema imunológico e pode causar câncer após longos períodos de exposição. Com relação ao Vanádio (V) pouco se sabe, uma vez que estudos sobre mecanismos de toxicidade e efeitos causados ao meio ambiente ainda são escassos com relação a este metal.

Com a finalidade de evitar maiores problemas ambientais e de saúde pública, o desenvolvimento e a implantação de tecnologias de tratamento de efluentes que sejam adequadas à remoção de tais elementos são muito importantes.

Em países como o Brasil, onde os recursos financeiros e a existência de pessoal tecnicamente qualificado ainda são limitados, há uma demanda por sistemas de baixo custo e com simplicidade de operação e



manutenção. Com base em tais critérios, os sistemas de tratamento que fazem uso dos processos de sorção através da utilização de materiais adsorventes “não convencionais” são bastante promissores.

Vários estudos de viabilidade de utilização de materiais adsorventes com características físico-químicas vantajosas para a remoção de compostos químicos têm sido realizados, principalmente em escala de laboratório. Dentre os diversos tipos de materiais investigados ultimamente, está o pó de serra, que segundo alguns autores é um dos adsorventes mais promissores, em consequência não somente de suas propriedades físico-químicas mas também de sua abundância, disponibilidade e baixo custo, principalmente em indústrias que utilizam a madeira com matéria prima. Todavia, as conclusões obtidas na maioria dos estudos devem ser consideradas com precaução, uma vez que tais estudos utilizam geralmente águas sintéticas com a adição de no máximo um ou dois metais, situação esta, completamente diferente do que ocorre no mundo real, onde efluentes industriais geralmente contêm um grande número de compostos orgânicos e inorgânicos. Tal complexidade cria condições desfavoráveis aos processos de remoção por adsorção, fato que não é levado em consideração ao se utilizar água sintética.

O principal objetivo do presente estudo foi investigar em escala de laboratório a viabilidade de um sistema de tratamento simples na remoção de Pb e V presentes em um efluente industrial através de processos de decantação/sedimentação primária, seguido por adsorção em pó de serra de *Pinus sylvestris*. A meta é que os resultados obtidos através do presente estudo auxiliem no desenvolvimento de um sistema de tratamento em escala piloto e, posteriormente, em escala de campo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Efluente – Foi investigada uma mistura de dois efluentes com características similares gerados na indústria de pisos de Madeira, AB Gustaf Kähr localizada em Nybro, Suécia. Os efluentes são gerados após a lavagem manual de pisos na indústria, porém em diferentes setores. Ambos os efluentes eram coletados imediatamente, à medida que eram gerados na fábrica, levados ao laboratório e misturados em um agitador na proporção de 1:1 (v:v). A característica do efluente final, resultante da mistura pode ser observada abaixo na Tabela 1.

Tabela 1: Característica do efluente final resultante da mistura dos efluentes industriais investigados

Parâmetro	pH	SS ^a	Fe	Zn	Mn	Ba	Cu	Pb	Cr	Ni	Co	V	As	Cd	DQO ^b	COT ^b
Unidade		mL L ⁻¹	mg L ⁻¹					µg L ⁻¹							mg L ⁻¹ (x 1000)	
Média	7,4	100	31,3	14,6	2,4	2,0	1,0	635	245	140	100,5	73	35	8,65	15-66	3,5-15
d.p. ^c	0,03	10	22,7	6,4	0,7	0,3	0,38	65	25	20	19,5	6	6	0,35		

^a SM = Sólidos sedimentáveis; ^b Valores mínimos e máximos; ^c d.p. = desvio padrão

Decantação/sedimentação – A simulação em escala reduzida dos processos de decantação/sedimentação deu –se através da utilização de um cone de Imhoff, onde um litro do efluente foi colocado. Amostras foram retiradas após dois testes distintos: (i) período de retenção de 24h e; (ii) período de retenção de 48h. As amostras foram estocadas a 4° C para posterior análise.

Métodos analíticos - A presença de metais como As, Ba, Pb, Cd, Cr, Co, Fe, Cu, Mn, Ni, V and Zn foi investigada, de acordo com o método ISO 17297-m; para demanda química de oxigênio DQO foi utilizado o método DIN 38409H41-1 e para carbono orgânico total TOC foi aplicado o método DIN 38403-H3.

Teste de adsorção em pó de serra

Preparação do adsorvente – O pó de serra de *Pinus sylvestris* foi coletado na própria indústria de pisos de madeira que produz os efluentes investigados. Após a coleta, o adsorvente passou por uma série de peneiras para que fosse selecionada apenas a fração com partículas de diâmetro ≤ 2 mm. Convém salientar que com a finalidade de testar a viabilidade de utilização do pó de serra em um sistema piloto implantado “in situ” na fábrica na forma mais simples e prática possível, o adsorvente não recebeu nenhum tipo de tratamento químico nem de lavagem prévia.

Testes em batelada - Dois testes de adsorção em batelada foram realizados: (i) teste sem ajuste do pH inicial, com o efluente mantido no valor natural de pH 7,4 e; (II) teste com o pH inicialmente ajustado para pH 4,0 baseado em dados de literatura.



- ***pH inicial sem ajuste:*** Com o efluente mantido em seu pH inicial de 7,4, diferentes quantidades de pó de serra foram testadas: 1,25, 2,5, 12,5, 25, 50 e 75 g L⁻¹. Um volume de 400 mL de efluente coletado do cone de Imhoff após 24 h de retenção (assumindo-se tal amostra como C₀; t=0) foi colocado em um beacker de 600 mL e mantido sob agitação constante (~ 700 rpm) em contato com o pó de serra. Ao longo dos 160 min de agitação, amostras foram retiradas com 5, 11, 17, 22, 40, 80 e 160 min de tempo de contato. Cada amostra foi imediatamente submetida à medição de pH (WTW Multi 340i) e em seguida, a um processo de separação da fase sólida - líquida através de filtração a vácuo (GF/C WHATMAN® 0.45µM Microfiber filters).
- ***pH inicial com ajuste:*** No segundo teste o efluente foi retirado do cone de Imhoff após 48 h de retenção e teve o pH inicial imediatamente ajustado para pH 4,0 através da adição de HCl (1 M). Com base nos resultados obtidos no primeiro teste de adsorção (pH inicial sem ajuste), a quantidade de pó de serra utilizada neste segundo teste foi de 25 g L⁻¹, quantidade esta que obteve a melhor performance na remoção tanto do Pb quanto do V. O teste com o pH inicial ajustado seguiu os mesmos padrões do teste descrito anteriormente, sendo que as amostras foram retiradas do beacker de adsorção com 5, 17, 40, 80 e 160 min de tempo de contato.

RESULTADOS

Sedimentação/Decantação: Os resultados obtidos com tempos de retenção de 24 h e 48 h, sugerem que os sólidos sedimentáveis presentes no efluente eram removidos já nas primeiras 24 h de retenção. Enquanto que em um período de 24 h no cone Imhoff foram observadas reduções de 85% e 93%, em 48 h foram obtidas reduções de 88% e 90% para V e Pb respectivamente.

Efeitos do pH inicial: Os resultados do teste de adsorção indicaram que a concentração de íons de hidrogênio teve uma influência considerável no processo de adsorção do Pb e do V ao pó de serra de *Pinus sylvestris*. Com o pH inicialmente ajustado para pH 4,0 foi observado um aumento considerável na remoção de ambos os metais, conforme ilustrado na Figura 1. No teste em que o pH inicial de 7,4 foi mantido sem ajuste, remoções de 32% e 43% apenas de Pb e V respectivamente foram obtidas ao fim dos 160 min de contato, enquanto que reduções de 99% e 95% de Pb e V respectivamente foram observadas no teste realizado com o pH inicialmente ajustado para 4,0. Um outro fato que foi observado durante o experimento com o pH inicial ajustado para a faixa ácida (pH 4,0) foi o aumento considerável na velocidade de reação, fazendo com que o tempo necessário para que o processo de sorção atingisse o estado de equilíbrio, fosse reduzido para aproximadamente 40 min de contato (Figura 1-a). Ao comparar as eficiências de remoção do Pb e do V obtidas após 40 min de contato em ambos os experimentos, pode-se observar uma eficiência reduzida no experimento realizado com o pH inicial 7,4 com reduções de Pb e V de apenas 21% e 37% respectivamente, confirmando a hipótese supra-mencionada de uma cinética de sorção muito mais rápida em soluções com pHs iniciais na faixa ácida. Os resultados observados no presente estudo estão de acordo com aqueles obtidos por Ucin et al. (2003), Ayyappan et al. (2005), e Yu et al. (2001), nos quais ao investigarem a sorção de Pb em biomassa de *Pinus sylvestris*, pó de serra do gênero *Acer sp* e pó de serra ativado, reportam eficiências máximas obtidas com os pHs inicialmente ajustados para a faixa entre 4,0 e 5,0.

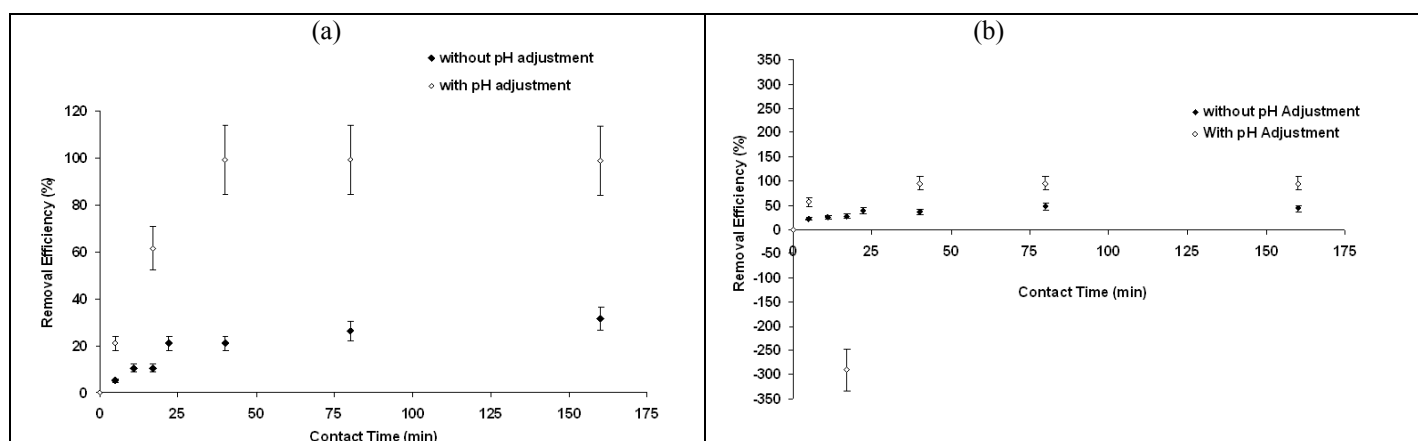


Figura 1: Eficiência do pó de serra de *Pinus sylvestris* com e sem ajuste do pH inicial na remoção de (a) Pb e (b) V.

Efeitos da dose de adsorvente: A Figura 2 mostra a remoção de Pb e V obtida com diferentes doses de pó de serra de *Pinus sylvestris* com o pH inicial 7.4 juntamente com a quantidade de metais adsorvida por unidade de massa de adsorvente – capacidade de sorção.

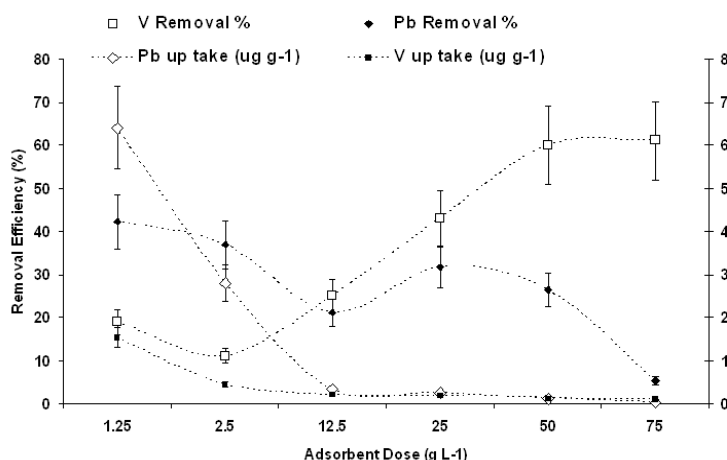


Figura 2: Eficiência de remoção (%) e capacidade de sorção de Pb e V do pó de serra de *Pinus sylvestris* de acordo com diferentes quantidades de adsorvente utilizados (Kaczala et al., 2009).

Os resultados obtidos demonstram uma correlação positiva entre a quantidade de pó de serra utilizado e a eficiência de remoção do V ($R^2 = 0,8798$). Reduções de 60% na concentração de V foram obtidas com quantidades de 50 g L⁻¹ de pó de serra, permanecendo a partir de então constante independente do acréscimo de mais 25 g L⁻¹ de adsorvente (quantidade final de 75 g L⁻¹). Tal resultado já era de se esperar, uma vez que com o aumento da quantidade de pó de serra ocorre um acréscimo na área superficial e, consequentemente, nos sítios de sorção ativos nas partículas de adsorvente, favorecendo assim uma maior interação adsorvato-adsorvente (Kaczala et al., 2009).

Por um outro lado, observou-se uma correlação negativa entre as quantidades de adsorvente e a eficiência de remoção de Pb ($R^2 = 0,7047$). Enquanto que com apenas 1,5 g L⁻¹ de pó de serra, uma redução de 42% de Pb foi obtida, com o aumento da dose de pó de serra para 75 g L⁻¹ a eficiência final foi reduzida para apenas 5%. Tal resultado sugere a liberação de Pb a partir do pó de serra utilizado, já que o adsorvente não recebeu nenhum tipo de lavagem nem tratamento químico anteriormente ao seu uso. A hipótese da liberação do Pb foi reforçada após a realização de testes em batelada com a presença do mesmo pó de serra em diferentes quantidades juntamente com água destilada por 160 min; uma correlação positiva ($R^2 = 0,8646$) entre a quantidade de adsorvente e a quantidade de Pb lixiviado foi observada. Não foi observado nenhum acréscimo na concentração de Pb em água destilada na presença de 10 e 25 g L⁻¹ de pó de serra de *Pinus sylvestris*; entretanto, na presença de 50 g L⁻¹ de adsorvente, a concentração de Pb na água aumentou em 160%, fato que explica a contradição entre os dados obtidos no presente estudo e dados da literatura onde na maioria das vezes é observada uma correlação positiva entre a quantidade de adsorvente e o percentual de remoção (Ucun et al., 2003; Yu et al., 2001). A eficiência de diferentes adsorventes é geralmente favorecida pela lavagem prévia dos mesmos com água destilada seguida de secagem, assim como pré-tratamentos que utilizam, por exemplo, ácidos e formaldeído conforme descrito por Li et al. (2007); Meunier et al. (2002); Taty-Costodes et al. (2003) e Vásquez et al. (1994). Em relação à capacidade de sorção do pó de serra de *Pinus sylvestris*, como era de se esperar, uma correlação negativa com as doses de adsorvente foi observada (Figura 3).

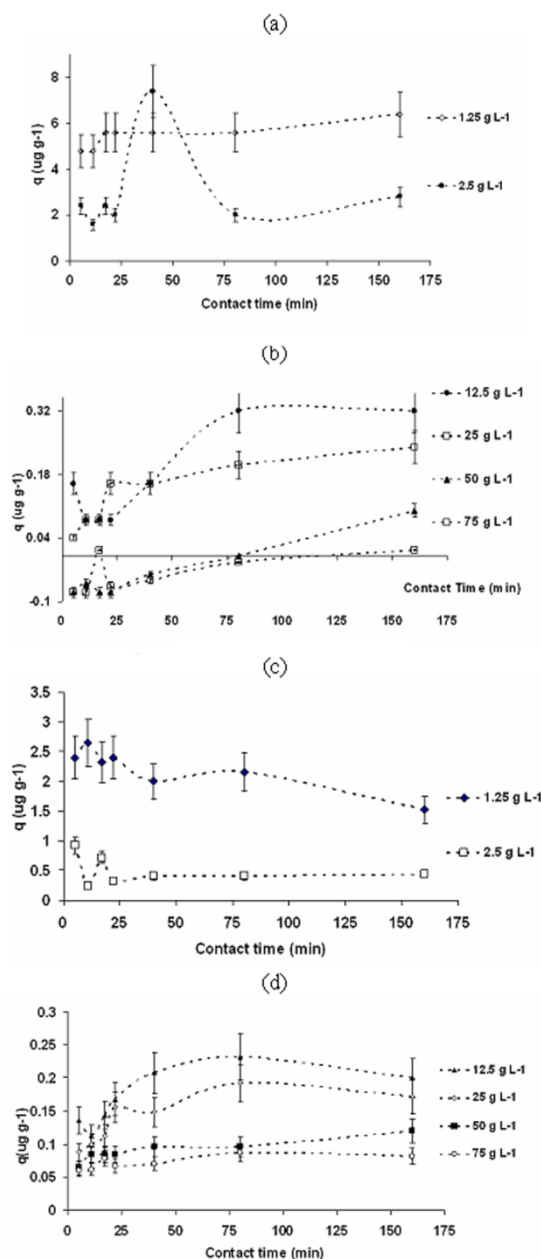


Figura 3: Efeito do tempo de contato na cinética de sorção de Pb (a,b) e V (c,d) com pH inicial 7.4. Concentrações iniciais: (a, b) $\text{Pb } C_0 = 19 \mu\text{g L}^{-1}$; (c, d) $\text{V } C_0 = 10 \mu\text{g L}^{-1}$ (Kaczala et al., 2009).

A Figura 3 mostra que ao aumentar as doses de adsorvente de 1,25 para 75 g L⁻¹, as quantidades de Pb e de V adsorvidas por unidade de massa do adsorvente eram gradualmente reduzidas de 6,4 para 0,01 $\mu\text{g g}^{-1}$ e de 1,52 para 0,08 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente. Ainda de acordo com a Figura 2, observa-se que o Pb apresentou uma afinidade maior ao pó de serra, principalmente levando em consideração baixas doses de adsorvente. Comparando-se com outros compostos metálicos, uma maior afinidade entre o Pb e materiais adsorventes similares ao utilizado no presente estudo é reportado na literatura por autores tais como Taty-Costodes et al., (2003) e Al-Asheh e Duvnjac (1997) que mencionam a alta afinidade do Pb tanto pelo pó de serra quanto pela casca de árvores de pinheiro. Tal comportamento pode ser explicado através da alta eletro-negatividade (2.33 na escala de Pauling) do Pb, juntamente com seu raio atômico (154 pm), menor do que o do V (Kaczala et al., 2009). De acordo com Jang et al. (2005) a eficiência de sorção de metais correlaciona-se negativamente com o tamanho de seus respectivos raios iônicos.

Efeitos do Tempo de Contato: Os resultados que relacionam a eficiência obtida em função do tempo de contato demonstram que o adsorvente quando testado em maiores concentrações (50 e 75 g L⁻¹) libera Pb, já nos primeiros 80 min de agitação, conforme mencionando anteriormente (Figura 4). Embora a partir dos 80 min, valores positivos de remoção do Pb tenham sido atingidos, convém salientar que a eficiência na remoção do Pb ao final de 160 min não foi satisfatória, levando à formulação da hipótese de que um tempo de contato prolongado (>160 min) seja necessário para que maiores percentuais de remoção sejam alcançados. Na Figura 4, pode-se observar o quão lenta é a cinética de sorção de Pb na água residuária real; ao compararmos as remoções obtidas nos tempos de contato de 40 min e 160 min na presença de 25 g L⁻¹ de pó de serra, apenas um pequeno acréscimo de 12% de eficiência de remoção foi obtido com percentuais de reduções passando de 20% para 32% ao fim de 40 e 160 min de contato respectivamente. O lento processo de sorção de Pb observado no presente estudo não está de acordo com dados de literatura apresentados por Taty-Costodes et al. (2003), que realizaram estudos de sorção de Pb em pó de serra, porém em soluções sintéticas com água destilada. Portanto, além da liberação do Pb pelo pó-de-serra, um outro aspecto a ser considerado no presente estudo é a natureza complexa dos efluentes industriais reais, tais como o aqui estudado, onde a presença de outros compostos e metais sugere que interferências na cinética de reação devam ocorrer, havendo necessidade de tempos de contato maiores do que 160 min para que se atinja o estado de equilíbrio final. Nehrenheim & Gustafsson (2008) também observaram um lento processo de adsorção de Pb em cascas de madeira ao investigarem a tratabilidade de uma água complexa com a presença de diferentes compostos, condição similar ao presente estudo.

No presente estudo, com um tempo de contato de 160 min, o estado de equilíbrio das reações de sorção de Pb e V foi atingido nos testes realizados com quantidades de adsorvente de 1,25 e 12,5 g L⁻¹ (Pb) e 2,5, 12,5 e 75 g L⁻¹ (V), conforme ilustrado nas figuras 4 e 5. Embora o processo de sorção de V tenha atingido o estado de equilíbrio ao fim dos 40 min iniciais no teste com a quantidade de adsorvente de 2.5 g L⁻¹ (10% de remoção), durante os 22 min iniciais, os percentuais de remoção oscilaram entre 23% e 8%.

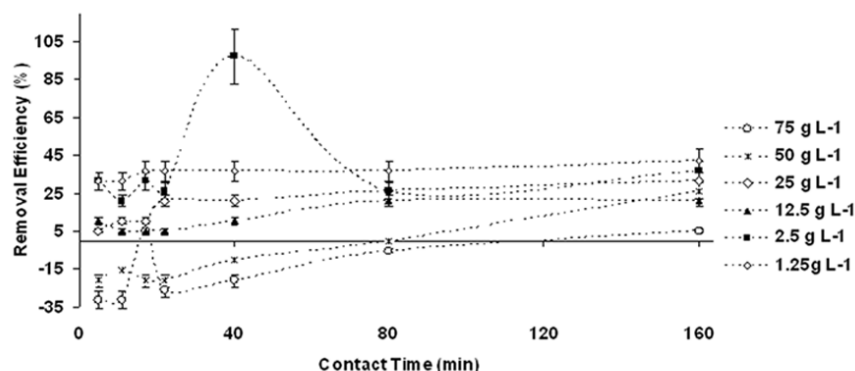


Figura 4: Efeito do tempo de contato e diferentes doses de adsorvente na redução de Pb; pH inicial 7.4. $C_0 = 19 \mu\text{g L}^{-1}$ (Kaczala et al., 2009)

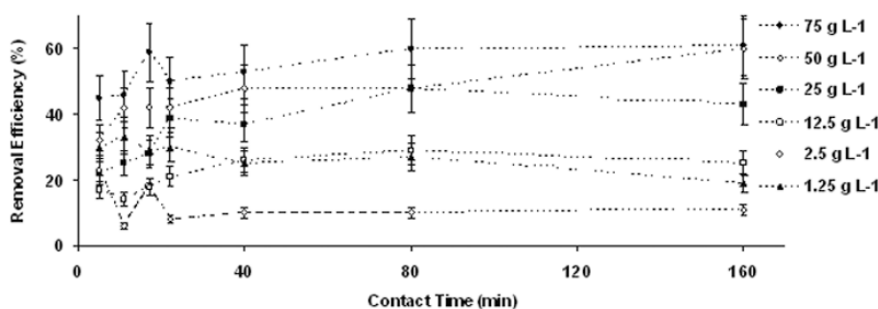


Figura 5: Efeito do tempo de contato e diferentes doses de adsorvente na redução de V. pH inicial 7.4. $C_0 = 10 \mu\text{g L}^{-1}$ (Kaczala et al., 2009).



Tal condição sugere um processo de sorção reversível, que pode estar relacionado neste caso, com a presença de diferentes compostos aniônicos e catiônicos no efluente investigado, fazendo com que houvesse uma competição por sítios de adsorção presentes no pó de serra de *Pinus sylvestris*. O processo de competição entre diferentes compostos do efluente testado, pode ter favorecido um decréscimo de remoção de V de 30% observados ao fim de 5 min para os 19% alcançados ao fim de 160 min no teste realizado com a dose de adsorvente de $1,25 \text{ g L}^{-1}$ (Figura 5).

Dinâmica do pH ao longo do experimento: No teste de adsorção com o pH inicial 7,4 (sem ajuste) uma redução de pH nos primeiros 5 min de contato entre adsorvente e adsorvato foi observada nos testes com altas concentrações de adsorvente (12,5; 25; 50 e 75 g L^{-1}), conforme ilustrado na Figura 6. A partir de então, passados os 5 min iniciais, verifica-se uma tendência de aumento de pH ao longo do tempo até atingir os 160 min de tempo de contato. De acordo com a Figura 6, pode-se observar que quanto menor a dose de pó de serra, menor é o decréscimo de pH nos primeiros 5 min e consequentemente, maior é o pH final atingido após os 160 min de contato. Através da Figura 6, observa-se que na presença de $1,25 \text{ g L}^{-1}$ de pó de serra, o pH é cai de 7,4 para 7,18, aumentando novamente até atingir o valor de 8,02 aos 160 min, quando o experimento foi finalizado. Por um outro lado, no teste realizado com a presença de 75 g L^{-1} de adsorvente, o pH inicial caiu de 7,4 para 6,37, apresentando em seguida um pequeno acréscimo até o valor final de 6,75 após 160 min. Os resultados obtidos no presente estudo em relação à dinâmica de pH estão de acordo com os obtidos por Ho (2005) que ao estudar a adsorção de Pb em adsorventes contendo lignina - elemento químico presente no pó de serra - observou um decréscimo de pH nos 3 min iniciais. De acordo com aquele autor, o aumento da concentração de íons de hidrogênio em solução está relacionado a um processo de perdas de prótons de grupos funcionais presentes na lignina, como ácidos carboxílicos por exemplo. Os estudos em laboratório realizados por Memon et al. (2007) demonstram que perdas de prótons em grupos funcionais carboxílicos presentes no pó de serra são favorecidas em pH iguais ou maiores que 4.

O teste de adsorção em batelada em que o pH foi inicialmente ajustado para 4,0 não apresentou variações significativas nas concentrações ao longo do experimento, permanecendo na faixa entre 4,0 e 4,1.

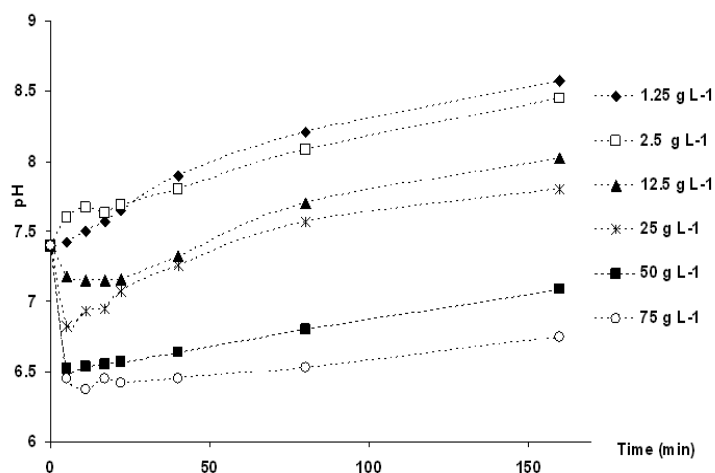


Figura 6: Características do efluente em relação ao pH ao longo dos 160 minutos de experimento

CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a viabilidade da utilização do pó de serra de *Pinus sylvestris*, ainda que sem tratamento prévio, para a remoção de Pb e V presentes em um efluente industrial real, independente de sua complexidade.

De acordo com os resultados, pode-se afirmar que o pH inicial é um fator de extrema importância para os processos de sorção com a utilização do pó de serra de *Pinus sylvestris* como material adsorvente. Foi observado um aumento significativo de eficiência de remoção de 32% para 99% no caso de Pb e de 43% para 95% no caso de V quando o pH inicial foi reduzido de 7,4 para 4,0. Por um outro lado, foi comprovado que o processo de decantação/sedimentação pode se constituir em uma importante fase de tratamento a ser implantado anteriormente à fase de adsorção no caso de tratamento de efluentes industriais que contêm metais, principalmente em sistemas que não incluem ajuste do pH inicial.



Enquanto que a remoção de V teve uma correlação positiva com as concentrações de pó de serra na fase aquosa, o mesmo não pode ser dito em relação ao Pb, devido à presença de Pb no pó de serra e a sua posterior liberação para a fase líquida, fato que foi corroborado pelos testes de lixiviação em laboratório. Foi observado um aumento de 160% na concentração de Pb em uma solução de água destilada em contato com 50 g L⁻¹ de pó de serra após 160 min de agitação.

Mesmo obtendo resultados bastante promissores em relação ao uso de um resíduo da indústria madeireira (pó de serra de *Pinus sylvestris*) para o tratamento de efluentes que contenham Pb e V, convém enfatizar que tendo em vista o fato de que estudos dessa natureza são em sua maioria realizados com água destilada à qual um ou dois metais são acrescentados, um melhor entendimento dos mecanismos de sorção responsáveis pela remoção de tais compostos em águas industriais reais faz-se necessário, pois mecanismos de sorção bastante complexos são esperados sob tais condições, em consequência da presença de inúmeros compostos orgânicos e inorgânicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES pela bolsa de doutorado no exterior concedida ao primeiro autor e a fundação sueca KK-Stiftelsen (Knowledge Foundation) pelo financiamento do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-ASHEH, S., DUVNJAK, Z. Sorption of cadmium and other heavy metals by pine bark. *Journal of Hazardous Materials*, v.56, p. 35-51, 1997.
2. AYYAPPAN, R., CARMALIN SOPHIA, A., SWAMINATHAN, K., SANDYA, S. Removal of Pb(II) from aqueous solution using carbon derived from agricultural wastes. *Process Biochem*, v.40, p. 1293-1299, 2005.
3. HO, Y.S. Effect of pH on lead removal from water using tree fern as the sorbent. *Bioresource Technology*, v.96, p. 1292-1296, 2005.
4. JANG, A., SEO, Y., BISHOP, P.L. The removal of heavy metals in urban runoff by sorption on mulch. *Environmental Pollution*, v.133, p. 117-127, 2005.
5. KACZALA, F., MARQUES, M., HOGLAND, W. Lead and Vanadium removal from a real industrial wastewater by gravitational settling/sedimentation and sorption onto *Pinus sylvestris* sawdust. *Bioresource Technology*, v.100, 235-243. 2009.
6. LI, Q., ZHAI, J., ZHANG, W., WANG, M., ZHOU, J. Kinetics studies of sorption of Pb(II), Cr(III) and Cu(II) from aqueous solution by sawdust and modified peanut husk. *Journal of Hazardous Materials*, v.141, p. 163-167, 2007.
7. MEMON, S.Q., MEMON, N., SHAH, S.W., KHUHAWAR, M.Y., BHANGER, M.I. Sawdust – A green and economical sorbent for the removal of cadmium (II) ions. *Journal of Hazardous Materials*, v.139, p. 116-121, 2007.
8. MEUNIER, N., BLAIS, J-F., TYAGI, R.D. Selection of a natural sorbent to remove toxic metals from acidic leachate produced during soil decontamination. *Hydrometallurgy*, v.67, p. 19-30. 2002.
9. NEHRENHEIM, E., GUSTAFSSON, J.P. Kinetic sorption modeling of Cu, Ni, Zn, Pb and Cr ions to pine bark and blast furnace slag by using batch experiments. *Bioresource Technology*, v.99, p. 1571-1577, 2008.
10. TATY-COSTODES, V., FAUDUET, H., PORTE, C., DELACROIX, A. Removal of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by sorption onto sawdust of *Pinus sylvestris*. *Journal of Hazardous Materials*, v.105, p. 121-142, 2003.
11. UCUN, H., KEMAL BAHYAN, Y., KAYA, Y., CAKICI, A., FARUK ALGUR, O. Biosorption of lead (II) from aqueous solution by cone biomass of *Pinus sylvestris*. *Desalination*, v.154, p. 233-238. 2003.
12. VÁSQUEZ, G., ANTORRENA, G., GONZÁLEZ, J., DOYAL, M.D. Sorption of heavy metal ions by chemically modified *Pinus pinaster* bark. *Bioresources Technology*, v.48, p. 251-255. 1994.
13. YU, B., ZHANG, Y., SHUKLA, A., SHUKLA, S.S., DORRIS, K.L. The removal of heavy metals from aqueous solutions by sawdust sorption – removal of lead and comparison of its sorption with copper. *Journal of Hazardous Materials*, v.84, p. 83-94, 2001.