



Belenia Yaneth Medina Bueno

**Remoção de Pb, Cr
e Cu por Processo Combinado Biossorção/
Bioflotação utilizando a Cepa *Rhodococcus Opacus***

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

Orientador: Maurício Leonardo Torem
Co-Orientadora: Luciana Maria Souza de Mesquita

Rio de Janeiro
Outubro de 2007



Belenia Yaneth Medina Bueno
Remoção de Pb, Cr
**e Cu por Processo Combinado Biossorção/
Bioflotação utilizando a Cepa *Rhodococcus Opacus***

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Maurício Leonardo Torem

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC - Rio

Dra. Luciana Maria Souza de Mesquita

Co-Orientadora

Agência Nacional do Petróleo-ANP

Dra. Marisa Beserra de Mello Monte

Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

Dr. Achilles Junqueira Bourdot Dutra

COPPE/ UFRJ - PEMM

Dr. Luis Alberto Teixeira

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia– PUC - Rio

Dr. Roberto José de Carvalho

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia– PUC - Rio

Dr. Francisco José Moura

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC - Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 29 de outubro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Belenia Yaneth Medina Bueno

Graduou-se em Engenharia Química na Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (Perú) em 2000. Obteve o título de Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2003, tendo como área de concentração: Metalurgia Extrativa.

Ficha Catalográfica

Bueno, Belenia Yaneth Medina

Remoção de Pb, Cr e Cu por processo combinado de Biossorção/Bioflotação utilizando a cepa *Rhodococcus opacus*/Belenia Yaneth Medina Bueno; orientador: Maurício Leonardo Torem; co-orientadora: Luciana Maria Souza de Mesquita. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2007.

172 f.: il.; 30 cm

Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1.Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. *Rhodococcus opacus*. 3. Metais pesados. 4. Biossorção. 5.Bioflotação. I.Torem, Maurício Leonardo. II. Mesquita, Luciana Maria Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. IV. Título.

CDD: 669

Em memória de minha mãe *Yolanda* e ao meu pãe *Jesús*.

Agradecimentos

Aos meus orientadores: professores Maurício Leonardo Torem e Luciana Maria Sousa de Mesquita pelo apoio e confiança depositados durante a realização deste trabalho.

À CAPES, CNPq, e PUC-Rio pelo auxílio financeiro concedido.

À Professora Maria Isabel Pais da Silva pelas análises no espectrofotômetro de Infravermelho. Ao Departamento de Química da PUC-Rio pelas análises de absorção atômica. Ao CETEM e a Thais Lima pelas imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura.

Aos meus colegas da PUC-Rio, aos professores, pesquisadores e funcionários do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio pelos ensinamentos e valiosas sugestões durante a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos Verónica, Gónzalo, Ismael, Alvaro, Jesús, Fabiola, Maurício e Varinia pelo apoio oferecido.

Ao Fernando Zeballos por seu apoio, paciência e compreensão.

Ao Flavio Molina por ter me colaborado durante o desenvolvimento experimental da tese.

Resumo

Medina Bueno, Belenia Yaneth; Torem, Maurício L. **Remoção de Pb, Cr e Cu por processo combinado de Biossorção/Bioflotação utilizando a cepa *Rhodococcus Opacus***. Rio de Janeiro, 2007. 172p. Tese de Doutorado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho foi avaliado o potencial do microorganismo *R. opacus* como biossorvente para a remoção de Pb(II), Cr(III) e Cu(II) de soluções aquosas pelo processo de biossorção/bioflotação, através de ensaios experimentais em batelada. Os parâmetros operacionais investigados na etapa de biossorção foram: o pH da solução, a concentração de biomassa, o tempo de contato e a concentração inicial do metal. Na separação da biomassa carregada mediante a bioflotação por ar disperso se avaliou o tempo de flotação, e as características da espuma. As características da superfície do micro-organismo e os possíveis mecanismos de interação envolvidos na sorção dos metais tóxicos por *R. opacus*, foram avaliadas com base em medições de potencial zeta, análise por espectrometria no infravermelho e análise de micrografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). O valor inicial do pH da solução afetou a sorção dos metais, os valores de pH adequados na etapa de sorção e na flotação foram de 5,0 para o Pb(II) e pH igual a 6,0 para o Cr(III) e Cu(II). Os ensaios da cinética de biossorção mostraram que o processo é rápido e em 60 minutos de contato entre a biomassa e a solução de metal foi atingida a máxima captação das espécies metálicas em estudo. Os dados correspondentes à capacidade de captação do *R. opacus* em função da concentração dos íons metálicos foram bem ajustados ao modelo da isoterma de Langmuir para as três espécies em estudo, onde as capacidades máximas de captação obtidas foram: 94,3; 72,9 e 32,2 mg.g⁻¹ para Pb(II), Cr(III) e Cu(II), respectivamente. A cinética da sorção para o Pb(II), Cr(III) e Cu(II) foram modeladas usando a equação de pseudo segunda ordem. A ordem de afinidade do *R. opacus* obtida em sistemas individuais foi estabelecida como: Pb(II)>Cr(III)>Cu(II). Essa diferença na afinidade do *R. opacus* pode ser atribuída às propriedades físico-químicas destes metais, dentre elas peso atômico, raio iônico e eletronegatividade. A capacidade de captação dos íons Pb(II) pela biomassa foi reduzida pela presença de outras espécies metálicas no sistema, apresentando o Cr(III) maior afinidade pelos sítios da biomassa do que os outros íons. Na bioflotação, verificou-se que o micro-organismo apresenta resultados muito promissores

como coletor e espumante, obtendo-se percentagens de remoção de Pb(II), Cr(III) e Cu(II) de 94%, 54% e 43% , respectivamente, partindo de uma concentração de 20 mg.l⁻¹. Os resultados apresentados mostram que *R. opacus* apresenta características adequadas no que tange a biossorção e bioflotação para a remoção de metais pesados.

Palavras-chave

Rhodococcus opacus, Metais Pesados, Biossorção, Bioflotação.

Abstract

Medina Bueno, Belenia Yaneth; Torem, Maurício L. (Advisor). **Removal of Pb, Cr and Cu by a Combined Biosorption / Bioflotation Process Using a *Rhodococcus Opacus* Strain**. Rio de Janeiro, 2007. 172p. PhD Thesis – Department of Materials and Metallurgic Science, Catholic Pontific University of Rio de Janeiro.

This work evaluated the potential of the *Rhodococcus opacus* strain as a biosorbent for the removal of Pb(II), Cr(III) and Cu(II) from aqueous solutions by biosorption/bioflotation process, through experimental batch tests. The operational parameters investigated in the biosorption's stage were: pH of the solution, biomass concentration, contact time and initial metal concentration. In the separation of the loaded biomass by bioflotation process for dispersed air were evaluated the flotation time and the foam characteristics. The characteristics of the microorganism surface and the involved interaction mechanisms in the heavy metals sorption by *R. opacus*, were evaluated based in the potential zeta measurements, infrared spectroscopy and electron microscopy scanning analysis. The solution initial pH value affected metals sorption, the adjusted pH values in the sorption and the flotation stage were 5.0 for the Pb(II) and pH value of 6.0 for the Cr(III) and Cu(II). The experiments of biosorption kinetics showed that the process is relatively fast and in sixty minutes of contact between the biomass and the metal solution were reached the maximum metal uptake capacities. The data pertaining to the uptake capacity of the *R. opacus* in function of the metal ion concentration fitted to the Langmuir isotherm model for the three species in study, where the maximum uptake capacities obtained were: 94.3; 72.9 and 32.2 mg.g⁻¹ for Pb(II), Cr(III) and Cu(II), respectively. The kinetics of sorption of Pb(II), Cr(III) and Cu(II) were modeled using a pseudo second order rate equation. The affinity order of *R. opacus* for the three metals under study has been established as: Pb(II)>Cr(III)>Cu(II). The selectivity of the biomass for the Pb(II) over the other two metals was well exhibited by the results obtained in the biosorption and bioflotation. This difference in the affinity of the *R. opacus* can be attributed to the physiochemical properties of these metals, amongst them atomic weight, ionic radio and electronegativity. The uptake capacity of ions Pb(II) for the biomass was reduced by the presence of other metallic species in the system, and the results showed that the Cr(III) has greater affinity for the biomass than the others ions. In the bioflotation, it was found that the microorganism presents excellent characteristics as collector and foaming agent,

reaching 94%, 54% and 43% removal of lead, chromium and copper, respectively, to 20 mg.l⁻¹ of concentration. The results of this study showed that *R. opacus* has important features for the heavy metal removal; moreover, the results also showed that *R. opacus* is especially effective biosorbent for the removal of Pb(II).

Keywords

Rhodococcus opacus; Heavy metals; Biosorption; Bioflotation.

Sumário

1	Introdução	19
1.1.	Poluição por Metais Tóxicos – Influência nos Seres Humanos	21
1.2.	Remoção de Metais Tóxicos de Efluentes Industriais	27
1.3.	Tecnologia da Biossorção	28
2	Objetivos e Relevância do Trabalho	30
2.1.	Objetivo Geral	31
2.2.	Objetivos Específicos	32
3	Revisão Bibliográfica	33
3.1.	Métodos de Remoção de Metais Tóxicos	33
3.1.1.	Métodos Convencionais	33
3.1.2.	Métodos Alternativos	34
3.2.	Processo de Biossorção	35
3.2.1.	Definição – Vantagens	35
3.2.2.	Mecanismos de Captação	36
3.2.3.	Potenciais Biosorventes	42
3.2.4.	<i>Rhodococcus opacus</i>	43
3.3.	Adsorção	45
3.3.1.	Mecanismos na Literatura	47
3.3.2.	Variáveis envolvidas no Processo de Biossorção	50
3.4.	Isotermas de Adsorção	53
3.4.1.	Modelo da Isoterma de Langmuir	55
3.4.2.	Modelo da Isoterma de Freundlich	58
3.4.3.	Modelos de Isotermas multicomponentes	58
3.5.	Fundamentos da Dupla Camada Elétrica	60
3.5.1.	Potencial Zeta	62
3.6.	Flotação no Tratamento de Efluentes Líquidos	64
3.6.1.	Técnicas para a Remoção de Íons e Particulados	65
3.6.2.	Flotação Sortiva	66
3.6.3.	Flotação por Ar Induzido (FAI)	68
3.6.4.	Flotação por Ar Dissolvido (FAD)	69

3.7. Remoção de Metais por Sorção/ Flotação	70
3.7.1. Cinética da Flotação	73
4 Materiais e Métodos	75
4.1. Procedência e preparo da biomassa	75
4.2. Preparo das soluções estoques dos diferentes íons metálicos	76
4.2.1. Caracterização do Material Biosorvente	76
4.3. Experimentos de Biossorção em Batelada	78
4.3.1. Efeito do pH	79
4.3.2. Efeito da Concentração de Biomassa	80
4.3.3. Determinação do Tempo de Equilíbrio	81
4.3.4. Efeito da Concentração inicial de Metal	82
4.3.5. Efeito da Presença de outros metais	82
4.4. Análise Quantitativa da Concentração dos Metais	83
4.5. Estudos de Flotação por Ar Disperso	84
4.5.1. Descrição da Linha Experimental	84
4.5.2. Metodologia Experimental dos Testes de Bioflotação	85
4.5.3. Caracterização das Amostras	87
5 Resultados e Discussão	88
5.1. Estudos Electrocinéticos	88
5.2. Testes de Biossorção em Batelada	90
5.2.1. Influência do pH nos processos de adsorção das espécies	91
5.2.2. Efeito da Concentração de <i>R. Opacus</i>	93
5.2.3. Perfil do tempo para a sorção dos metais	95
5.2.4. Cinética da Sorção	96
5.2.5. Isotermas de Biossorção	103
5.2.6. Modelos de Isoterma de Adsorção	105
5.3. Biossorção em sistemas binários e ternários	107
5.3.1. Efeito da Temperatura	115
5.3.2. Parâmetros Termodinâmicos da Biossorção de Pb(II)	116
5.4. Testes de Flotação por Ar Disperso	124
6 Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros	136
6.1. Conclusões	136
6.2. Recomendações para trabalhos futuros	138

7 Referências Bibliográficas	139
Apêndice	162
Curva de Calibração por peso seco do <i>R. opacus</i>	162
Curva de Calibração do Rotâmetro	162
Caracterização da bactéria <i>R. opacus</i>	163
Programa em Matlab para o cálculo das Isotermas de Adsorção em Sistemas Binários.	165
Langmuir – Modelo 1	165
Langmuir-Freundlich : Modelo 2	171
Principais poluentes de despejos industriais	172

Lista de Figuras

Figura 1 - Adsorção de moléculas na superfície do adsorvente.	38
Figura 2 - Mecanismo de Biossorção: Classificação de acordo com a dependência do metabolismo celular (Veglio e Beolchini, 1997).	39
Figura 3 - Mecanismo de Biossorção: Classificação de acordo com o sítio onde o metal é removido (Veglio e Beolchini, 1997).	39
Figura 4 - <i>Rhodococcus opacus</i> submetido a 60 dias de desidratação, correspondente a uma escala de 1µm (Alvarez et al., 2004).	44
Figura 5 - Representação de algumas Isotermas, Oscik (1982).	54
Figura 6 - Modelo da Dupla Camada (Bockris e Reddy apud, Luz et al., 2002)	62
Figura 7 - Etapas envolvidas no processo de flotação sortiva para a remoção de íons em solução.	70
Figura 8 - Esquema dos experimentos de biossorção em batelada.	79
Figura 9- Linha de Montagem da Coluna de Flotação	85
Figura 10- Potencial Zeta das células <i>R. opacus</i> (0.2 g.L ⁻¹); influência do pH da solução em presença de metais (100 mg.L ⁻¹).	88
Figura 11 - Diagrama de Especiação das espécies de Pb(II) presente numa concentração de 20mg.l ⁻¹ em função do pH (Smith et al., 1996).	89
Figura 12 - Diagrama de Especiação das espécies de Cr(III) presente numa concentração de 20mg.l ⁻¹ em função do pH.	89
Figura 13 - Diagrama de especiação das espécies de Cu(II) presente numa concentração de 20 mg.l ⁻¹ em função do pH (Wang e Qin, 2005).	90
Figura 14- Efeito do pH na biossorção de Pb(II) , Cu(II) e Cr(III) por <i>R. Opacus</i> (concentração inicial de metal: 20 mg.L ⁻¹ ; concentração de biomassa: 1,0 g.L ⁻¹ ; velocidade de agitação: 150 rpm; tempo de contato: 4 h).	92
Figura 15- Efeito da Concentração de Biomassa na biossorção de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) por <i>R. opacus</i> (concentração inicial de metal: 20 mg.L ⁻¹ ; pH: 5.0 para o Pb(II) e pH:6.0 para o Cu(II) e Cr(III); velocidade de agitação: 150 rpm; tempo de contato: 4 h).	94
Figura 16- Perfil do tempo na biossorção dos íons Pb(II), Cu(II) e Cr(III) por <i>R. Opacus</i> (concentração de biomassa: 1g.L ⁻¹ ; pH:5,0 para Pb(II) e pH:6,0 para Cu(II) e Cr(III); velocidade de agitação: 150 rpm).	96

- Figura 17- Aplicação dos resultados cinéticos ao modelo de difusão externa para a captação de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) usando *R. opacus*. 100
- Figura 18- Aplicação dos resultados cinéticos ao modelo de difusão intrapartícula para a captação de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) usando *R. opacus*. 100
- Figura 19- Aplicação dos resultados cinéticos ao modelo de pseudo-primeira ordem para a captação de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) usando *R. opacus*. 101
- Figura 20- Aplicação dos resultados cinéticos ao modelo de pseudo-segunda ordem para a captação de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) usando *R. opacus*. 101
- Figura 21- Efeito da concentração do metal na biossorção dos íons Pb(II), Cu(II) e Cr(III) por *R. opacus* (concentração de biomassa: 1 g.l⁻¹; pH:5,0 para o Pb(II) e pH:6,0 para o Cu(II) e Cr(III); velocidade de agitação: 150 rpm; tempo de contacto: 4 h). 104
- Figura 22- Aplicação da equação de Langmuir para a biossorção de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) por *R. opacus*. 105
- Figura 23- Efeito da presença de outros metais na biossorção de chumbo em *R. opacus* (pH 5,0 ; concentração de biomassa: 2 g.L⁻¹, concentração do Cu(II) e Cr(III): 30mg.l⁻¹; velocidade de agitação de 150 rpm, tempo de contato: 10 h a 25°C). 108
- Figura 24 – Efeito da presença de outros metais na biossorção de Pb(II).pH:5,0; Concentração de *R. opacus*: 2g.l⁻¹,Concentração equimolar dos metais. 109
- Figura 25- Efeito da presença de íons Cr(III) na biossorção de Pb(II). pH:5,0; concentração de *R. opacus*: 2g.l⁻¹, concentração equimolar dos metais. 111
- Figura 26 – Efeito da presença de íons Pb(II) na biossorção de Cr(III).pH:6,0; concentração de *R. opacus*: 2g.l⁻¹, concentração equimolar dos metais. 112
- Figura 27 - Comparação das isotermas não linearizadas para a biossorção do Pb(II) por *R. opacus*, com o Pb(II) presente sozinho e na presença de incrementadas concentrações de íons Cr(II), para pH:5,0; concentração de biomassa:2 g.l⁻¹. 113
- Figura 28 – Comparação das isotermas não linearizadas para a biossorção do Pb(II) por *R. opacus*, com o Pb(II) presente sozinho e na presença

- de incrementadas concentrações de íons Cu(II), para pH:5,0; concentração de biomassa:2 g.l⁻¹. 114
- Figura 29 - Comparação das isotermas não linearizadas para a biossorção do Cr(III) por *R. opacus*, com o Cr(III) presente sozinho e na presença de incrementadas concentrações de íons Pb(II), para pH:6,0; concentração de biomassa:2 g.l⁻¹. 114
- Figura 30 - Variação de lnk com 1/T 116
- Figura 31 – Correlação entre a constante de equilíbrio e a temperatura na adsorção dos íons Pb(II) em *R. opacus*. 119
- Figura 32- Microfotografias do Microscópio Eletrônico de Varredura da biomassa (a) antes e (b) após o contato com as espécies Pb(II), Cu(II) e Cr(III). O pH do meio aquoso foi 5, e a concentração de *R. opacus* foi 2 g.l⁻¹ e um tempo de contato de 4 h. 120
- Figura 33- Composição elementar da biomassa (a) antes e (b) após o contato com os íons Pb(II), Cu(II) e Cr(III). pH do meio aquoso: 5, concentração de *R. opacus* :2 g.l⁻¹, tempo de contato de 4 h. 120
- Figura 34- FT-IR espectro da biomassa *R. opacus* antes e após o contato com os íons Pb (II) e Cr(III). 122
- Figura 35- FT-IR espectro da biomassa *R. opacus* antes e após o contato com os íons Pb (II), para pH de 5,0. 123
- Figura 36- FT-IR espectro da biomassa *R. opacus* antes e após o contato com os íons Cr (III), para pH de 6,0. 123
- Figura 37 - Formação da espuma no processo de bioflotação de Pb(II) mediante *R.opacus*, numa coluna de flotação por ar disperso a pH 5,0, temperatura 25± 2°C. a) Coluna de Bioflotação de diâmetro interno 5,7 cm e comprimento 75 cm. b) Formação de espuma depois dos primeiros 10 minutos de bioflotação. c) Formação de espuma no final do processo. 125
- Figura 38- Influência do tempo de flotação na separação da biomassa carregada com metais por FAI. Concentração inicial dos íons metálicos: 20 mg.l⁻¹; Concentração de biomassa: 1g.l⁻¹; vazão:2,17 cm³.s⁻¹. 126
- Figura 39 - Fórmula estrutural da molécula de ácido micólico presente na parede celular de *R. opacus* onde R₁ e R₂ são cadeias longas de hidrocarbonetos alifáticos, cujo número de átomos de C varia entre 30 e 90 (Madigan et al., 1997). 126

Figura 40- Efeito da Concentração de Biomassa na Remoção de Cu(II) por FAI. Conc. inicial de cobre:20 mg.l ⁻¹ ; pH:6,0; vazão:2,17 cm ³ .s ⁻¹ .	131
Figura 41- Efeito da adição de outras espécies na captação de Pb(II) por FAI. Conc. equimolar das espécies metálicas: 20mg.l ⁻¹ ; Conc. de Biomassa:1g.l ⁻¹ ; pH:5,0; vazão:2,17 cm ³ .s ⁻¹ .	132
Figura 42- Efeito da Adição de outros metais na Remoção de Cu(II) por FAI. Conc. inicial dos metais: 20 mg.l ⁻¹ ; Conc. de biomassa:2g.l ⁻¹ ; pH:6,0; vazão:2,17 cm ³ .s ⁻¹ .	133
Figura 43- Efeito da adição de etanol na remoção de Cr(III) por FAI. Conc do Cr(III):20mg.l ⁻¹ ; Conc de Biomassa:1g.l ⁻¹ ;pH:5,0; vazão:2,17 cm ³ .s ⁻¹ .	134
Figura 44- Efeito da adição de outras espécies na captação de Cr(III) por FAI. Conc. equimolar das espécies metálicas:20mg.l ⁻¹ ; Conc. de Biomassa:1g.l ⁻¹ ; pH:6,0; vazão:2,17 cm ³ .s ⁻¹ .	134
Figura A45 – Curva de peso seco das células de <i>R. opacus</i> .	162
Figura A46 – Curva de Calibração do Rotâmetro.	162
Figura A47- Células isoladas e colônias da bactéria <i>R. opacus</i>	163
Figura A48 - Microfotografia da espuma da bioflotação de Cu(II) com <i>R. opacus</i> obtida através do Microscópio Eletrônico de Varredura. Conc. inicial do metal:100mg/l, conc da biomassa:1g/l. Aumento:100x.	163
Figura A49 – Microfotografias da espuma da bioflotação de Cu(II) com <i>R. opacus</i> obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura. Conc. inicial do metal:100mg/l, Conc da biomassa:1g/l. (a) Aumento:2000x, (b) Aumento: 3000x.	164
Figura A50 - Microfotografias da espuma da bioflotação com <i>R. opacus</i> obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura. Conc. inicial do metal:100mg/l, Conc da biomassa:1g/l. (a) Pb(II), pH:5,0, Aumento:3000x, (b) Cr(III), pH:6,0, Aumento: 2000x.	164
Figura A51 – Microfotografia da espuma da bioflotação da mistura: Pb(II)+Cr(III)+Cu(II) com <i>R. opacus</i> obtida através do Microscópio Eletrônico de Varredura. Conc. equimolar do metal:50mg/l, Conc. da biomassa:1g/l, pH:5,0. Aumento: 2000x.	165

Lista de tabelas

Tabela 1 - Efeito dos metais na saúde humana.	22
Tabela 2 - Principais grupos ionizáveis em polímeros biológicos susceptíveis de participar na união a metais pesados.	37
Tabela 3 - Biossorção de Pb, Cu e Cr por diversas biomassas microbianas.	43
Tabela 4 - Comparação entre adsorção física e química.	47
Tabela 5 - Parâmetros característicos da força de ligação nos metais.	48
Tabela 6 - Principais características entre a flotação convencional de minérios e a flotação aplicada ao tratamento de águas, esgoto e efluentes líquidos industriais.	65
Tabela 7 - Descrição de técnicas de remoção de sólidos, íons e substâncias dissolvidas por flotação.	66
Tabela 8 - Tipos de sorventes empregados na flotação sortiva	72
Tabela 9 – Condições empregadas para a determinação da influencia do pH no processo de biossorção.	80
Tabela 10 – Valores experimentais dos parâmetros.	81
Tabela 11 - Condições empregadas na determinação do tempo de equilíbrio	81
Tabela 12- Valores experimentais dos parâmetros.	82
Tabela 13- Comprimentos de onda característicos usados por AA para os metais estudados	84
Tabela 14- Condições para avaliar a velocidade de flotação.	86
Tabela 15 - Parâmetros Cinéticos para a biossorção de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) em <i>R. opacus</i> .	99
Tabela 16 - Constantes de adsorção estimadas com os Modelos das Isotermas de Langmuir e Freundlich na biossorção de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) usando <i>R. opacus</i> .	106
Tabela 17 - Sistema de captação de metais em sistemas simples e competição em sistemas binários e ternários para concentração inicial de metal 150mg.l ⁻¹ .	109
Tabela 18 – Parâmetros binários das isotermas de adsorção.	112
Tabela 19 – Efeito da temperatura nas constantes de taxa do modelo de pseudo segunda ordem.	115
Tabela 20 – Efeito da temperatura na captação de íons Pb(II) em <i>R. opacus</i> .	118
Tabela 21- Bandas de absorção IR e possíveis grupos correspondentes.	121

