

Lorgio Gilberto Valdiviezo Gonzales

**O efeito de diferentes eletrodos metálicos na
eletrocoagulação de efluentes oleosos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio

Orientador: Prof. Mauricio Leonardo Torem

Rio de Janeiro
Agosto de 2008



Lorgio Gilberto Valdiviezo Gonzales

**O efeito de diferentes eletrodos metálicos na
eletrocoagulação de efluentes oleosos**

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

Prof. Mauricio Leonardo Torem

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia —
PUC-Rio

Prof. Roberto José de Carvalho

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia - PUC-Rio

Prof. Achilles Junqueira bourdot Dutra

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de Agosto de 2008

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

Lorgio Gilberto Valdiviezo Gonzales

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica pela UNT (Universidade Nacional de Trujillo) em 2003. Kursou Mestrado em Engenharia Metalúrgica no DCMM/PUC-Rio em 2008.

Ficha Catalográfica

Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto

O efeito de diferentes eletrodos metálicos na eletrocoagulação de efluentes oleosos / Lorgio Gilberto Valdiviezo Gonzales; orientador: Mauricio Leonardo Torem. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2008.

v., 116 f: il. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia.

Inclui referências bibliográficas.

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Tese. 2. Eletrocoagulação. 3. Efluentes oleosos. 4. Anodos Al-Fe. 5. Remoção DQO, Turbidez. I. Torem, Mauricio Leonardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão.

Agradecimentos

A Deus pelo amparo e oportunidades.

Ao professor Maurício Leonardo Torem , pela sua valorosa orientação e dedicação, para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da Comissão Examinadora Roberto de Carvalho, e Achilles Bourdot, que aceitaram revisar o trabalho, agregando-lhe valor.

Aos Professores e colegas da PUC-Rio pelas ensinanzas e ajuda.

Ao Brasil, pela oportunidade do mestrado e por fazer minha estadia, cheia de Boas lembranças, obrigado por tudo.

A Patricia, Mariana, Rafaela e Abiatar pela amizade.

A minha mãe e irmão : Augusta Gonzales Lopez e Juan Carlos Valdiviezo Gonzales, pela constante valorização e incentivo ao estudo e ao conhecimento.

A meu Pai, sempre presente nas minhas lembranças.

Por fim, a Jaime, Epifanio e Luis Renato, aqueles que sempre ficaram por perto nos momentos de alegria e tristeza; amigos e irmãos. \LaTeX .

Resumo

Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto; Torem, Mauricio Leonardo. **O efeito de diferentes eletrodos metálicos na eletrocoagulação de efluentes oleosos**. Rio de Janeiro, 2008. 116p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No presente trabalho, foi avaliado num modo sistemático o processo de eletrocoagulação (EC) usando eletrodos de alumínio e ferro como material de anodo e aço inoxidável como material de catodo, operando com diferentes parâmetros tais como: concentração inicial do óleo, distanciamento entre os eletrodos, relação área-volume (SA/V) e densidade de corrente. A redução da demanda química de oxigênio (DQO) e turbidez foram às principais variáveis respostas analisadas. Os ensaios foram feitos em batelada com um efluente sintético (5,1 litros) e com agitação magnética (150 rpm). A densidade de corrente e a relação SA/V foram os parâmetros com maior influência no processo. O aumento deles reduz notoriamente o tempo de tratamento. Os resultados mostraram que a eletrocoagulação, para os dois tipos de materiais (Fe/Al), conseguem uma excelente redução da DQO e da turbidez nas seguintes condições experimentais: densidade de corrente, 9,4 mA/cm², distanciamento entre os eletrodos, 10 mm, relação área-volume(SA/V), 30,35 m²/m³ e 30 minutos de operação.

Eficiências de redução de 99% e 98,3% foram alcançadas para a DQO e a turbidez com anodos de alumínio. Do mesmo modo 94,8% da DQO e 98,5% da turbidez para o caso do ferro foi reduzido do efluente sintético. O processo de eletrocoagulação, operando nessas condições envolve um custo total de 7,1 R\$/m³ e 5 R\$/m³ por metro cúbico para alumínio e ferro, respectivamente. Estes custos só incluem custo de energia e consumo dos eletrodos. A borra produzida foi de 2,23 kg/m³ para alumínio e 2,76 kg/m³ para o ferro. Finalmente, o consumo de energia foi de 4,15 kWh/m³ e 3,72 kWh/m³ para alumínio e ferro, respectivamente. Um tratamento de eletrocoagulação para um efluente oleoso sintético foi satisfatoriamente implementado do ponto de vista da redução destes parâmetros.

Palavras-chave

Eletrocoagulação. Efluentes oleosos. Anodos Al-Fe. Remoção DQO, Turbidez.

Abstract

Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto; Torem, Mauricio Leonardo. **The effect of different metallic electrodes on the electrocoagulation of oily wastewater**. Rio de Janeiro, 2008. 116p. MsC Thesis — Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the present work, electrocoagulation process (EC) with aluminum and iron as materials for anode and stainless steel as cathode, under different operational parameters, such as: initial concentration of oil, distance between electrodes, area-volume relation (SA/V) and current density, were examined in a systematic manner. Chemical oxygen demand (COD) and turbidity removals were selected as a performance criteria. Tests were carried out batch-wise in an electrochemical cell (5.1 liter) with synthetic wastewater and with magnetic stirring (150 rpm); the current density and SA/V relation were found to be the most significant parameters, an increase of theses notably reduces the electrocoagulation required time for the treatment. The results have shown that electrocoagulation, using both kind of materials (Fe/Al), successfully removes the COD and turbidity in experimental conditions such as: the current density, 9.4 mA/cm², distance between electrodes, 10 mm; SA/V relation, 30.35 m²/m³ and 30 minutes of operation .

Removal efficiencies over 99% and 98.3% were measured for COD and turbidity, using anodes of aluminum. Likewise 94.8% of COD and 98.5% of turbidity were removed from synthetic wastewater, using anode of iron. Electrocoagulation process operated under theses conditions involves a total cost of 7.1 R\$/m³ for aluminum and 5 R\$/m³ for iron per meter cubic of treated wastewater. These costs only include energy cost and electrode consumptions. The sludge produced after electrocoagulation treatment was 2.23 kg/m³ for aluminum and 2.76 kg/m³ for iron, and the power requirements were 4.15 kWh/m³ and 3.72 kWh/m³ for aluminum and iron. An electrocoagulation treatment of a synthetic wastewater was successfully implemented from removal efficiency point of view.

Keywords

Electrocoagulation. Oily water. Anode Al-Fe. Removal COD, turbidity.

Sumário

1	Introdução	16
2	Efluentes oleosos e principais tratamentos	19
2.1	Emulsão	19
2.2	Efluentes oleosos e principais parâmetros de caracterização.	20
2.3	Tratamentos tradicionais nos efluentes oleosos	22
2.4	Tratamentos não tradicionais nos efluentes oleosos	23
2.4.1	Tratamentos Eletrolíticos	24
2.5	Eletrocoagulação, (EC)	24
2.5.1	Comparação entre Coagulação e Eletrocoagulação	25
2.6	Processos híbridos	27
3	Fundamentos da Eletrocoagulação	29
3.1	Principais Parâmetros na Eletrocoagulação	29
3.1.1	Densidade de Corrente	32
3.1.2	Material de Eletrodo	33
3.1.3	Consumo de Eletrodos	40
3.1.4	Arranjo de eletrodos	41
3.1.5	pH	43
3.1.6	Distância entre os eletrodos	43
3.1.7	Condutividade elétrica do efluente	44
3.2	Projeto e operação do reator de Eletrocoagulação	46
4	Materiais e Métodos	49
4.1	Preparação do efluente sintético	49
4.1.1	Materiais e equipamentos	49
4.2	Análise da estabilidade da emulsão	50
4.3	Desenho da Célula	50
4.4	Desenho, arranjo e tipo de material dos eletrodos	51
4.5	Decapagem dos eletrodos	53
4.6	Procedimento experimental	53
4.7	Análise da Demanda Química de Oxigênio e Turbidez	57
5	Resultados e Discussão	58
5.1	Efeito da Densidade de Corrente Elétrica	58
5.1.1	Anodos de Alumínio	59
5.1.2	Anodos de Ferro	62
5.2	Consumo de Energia	66
5.3	Efeito da distância dos eletrodos	67
5.3.1	Anodos de Alumínio	67
5.3.2	Anodos de Ferro	70
5.3.3	Efeito da distância entre os eletrodos no consumo de energia	74
5.4	Efeito da concentração inicial de óleo	74
5.4.1	Anodos de Alumínio	76

5.4.2	Anodos de Fe	78
5.5	Efeito da densidade de corrente elétrica na mudança de pH	81
5.5.1	Anodos de Alumínio	82
5.5.2	Anodos de Ferro	84
5.6	Efeito da relação Área-Volume, SA/V	86
5.6.1	Anodos de Alumínio	86
5.6.2	Anodos de Ferro	87
5.7	Consumo de Eletrodos	89
5.7.1	Consumo Teórico	89
5.7.2	Consumo Experimental	90
5.8	Geração de borra	92
5.9	Melhores parâmetros	93
5.9.1	Anodos de Alumínio	93
5.9.2	Anodos de Ferro	95
5.10	Efeito da geometria dos eletrodos	98
5.11	Custo de operação	100
6	Conclusões e Recomendações	102
7	Referências Bibliográficas	104
	Sumário das notações	111
A	Método de determinação de demanda química de oxigênio (DQO) (Método Hatch [80])	113
A.1	Interferências:	113
A.2	Material necessário:	113
A.3	reagentes necessários	114
A.4	Preparação de Reagentes	114
A.4.1	Solução padrão de ftalato ácido de potássio:	114
A.4.2	Solução digestora para a faixa de DQO 0 - 1000 mg/L	114
A.4.3	Solução catalítica	115
A.5	Procedimento	115

Lista de figuras

2.1	Típica representação da emulsão.	20
2.2	Formação de Micela.	20
2.3	Principais Fenômenos na Eletrocoagulação	26
2.4	A eletrocoagulação dentro dos Processos híbridos, [44]	28
3.1	Mudança na concentração de Al^{3+} , H^+ e OH^- perto do anodo.[48]	31
3.2	Mudança da concentração de ions H^+ e OH^- perto do catodo.[48]	31
3.3	Diagrama de distribuição para $Al-H_2O$ considerando só espécies mononucleares [53].	35
3.4	Diagrama de Pourbaix para $Al-H_2O$, 25 °C	36
3.5	Diagrama de Pourbaix para $Fe-H_2O$ [3].	40
3.6	Diagrama logC-pH para $Fe-H_2O$	41
3.7	Arranjo de eletrodos, a) Sistema monopolar em paralelo, b)Sistema monopolar em série, c)Sistema bipolar em série.	42
3.8	Classificação dos reatores de eletrocoagulação [53].	48
4.1	Célula de Eletrocoagulação	51
4.2	Desenho dos eletrodos perfurados de alumínio, ferro e aço inoxidável	52
4.3	Arranjo de eletrodos a) sistema monopolar em paralelo com quatro eletrodos b)sistema monopolar em paralelo com seis eletrodos	56
4.4	Unidade experimental de Eletrocoagulação (1) Fonte de tensão (corrente contínua), (2) Célula eletrolítica, (3) Agitador magnético, (4) multímetro	56
5.1	Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]=1g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm.	60
5.2	Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al, 6 eletrodos, $d_e = 5$ mm.	61
5.3	Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm.	61
5.4	Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al 6 eletrodos, $d_e = 5$ mm.	62
5.5	Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de ferro, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm	63
5.6	Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]= 1 g/l; anodos de ferro, 6 eletrodos; $d_e = 5$ mm.	64
5.7	Efeito da Densidade de corrente na eficiência de redução da Turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de ferro, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm.	65

5.8	Efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de ferro; 6 eletrodos; $d_e = 5$ mm.	65
5.9	Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, 4 eletrodos de Al, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	69
5.10	Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo; [surfatante]= 1 g/l, [óleo]=1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al, 6 eletrodos, $\delta = 9,4$ mA/cm ² .	69
5.11	Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al, 4 eletrodos, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	70
5.12	Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de Al; 6 eletrodos, $\delta = 9,4$ mA/cm ² .	71
5.13	Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo:[surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]= 1 g/l, anodos de ferro 4 eletrodos ; $\delta = 9,4$ mA/cm ²	72
5.14	Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da DQO em função do tempo:[surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]=1 g/l; Anodos de ferro, 6 eletrodos, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	73
5.15	Efeito da distância dos eletrodos(Fe) na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]=1 g/l, anodos de Fe, 4 eletrodos, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	73
5.16	Efeito da distância dos eletrodos na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, [NaCl]=1 g/l, Anodos de ferro; 6 eletrodos, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	74
5.17	Distância entre os eletrodos versus consumo de energia ;[surfatante]=1g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de alumínio; 6 eletrodos ; $\delta = 9,4$ mA/cm ²	75
5.18	Distância entre os eletrodos versus consumo de energia ;[surfatante]=1g/l; [óleo]= 1,5 g/l; [NaCl]=1 g/l; Anodos de ferro; 6 eletrodos ; $\delta = 9,4$ mA/cm ²	75
5.19	Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Al; 4 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² ;	77
5.20	Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Al, 6 eletrodos, $d_e = 10$ mm, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	77
5.21	Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l, [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al; 4 eletrodos, $d_e = 10$ mm, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	78
5.22	Efeito da concentração inicial do óleo na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Al; 6 eletrodos ; $d_e = 10$ mm, $\delta = 9,4$ mA/cm ²	79
5.23	Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; 4 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ²	80

5.24	Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da DQO em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Fe; 6 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ²	80
5.25	Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da Turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; 4 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² (Fe)	81
5.26	Efeito da concentração inicial de óleo na eficiência de redução da turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; 6 eletrodos ; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² (Fe)	82
5.27	Comportamento de pH em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l, Anodos de Al, 4 eletrodos, $d_e = 5$ mm.	83
5.28	Comportamento de pH em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodo de Al; 6 eletrodos ; $d_e = 5$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² .	84
5.29	Comportamento de pH em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodo de Ferro; 4 eletrodos ; $d_e = 5$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ²	85
5.30	Comportamento de pH em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; Anodos de Ferro; 6 eletrodos ; $d_e = 5$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ²	86
5.31	Efeito da relação SA/V na eficiência de redução da DQO e turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² ; Anodos de Al	88
5.32	Efeito da Relação SA/V na eficiência de redução da DQO e turbidez em função do tempo: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² ; Anodos de ferro	89
5.33	Consumo do material de anodo	92
5.34	Borra com anodos de alumínio.	93
5.35	Borra com anodos de Ferro.	94
5.36	Melhores parâmetros na redução de DQO e turbidez: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]= 1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² ; 3 anodos de Al.	95
5.37	Melhores Parâmetros na Remoção de DQO e turbidez: [surfatante]= 1 g/l; [NaCl]=1 g/l; [óleo]= 1,5 g/l; $d_e = 10$ mm; $\delta = 9,4$ mA/cm ² ; 3 anodos de Fe.	96
5.38	Efluente filtrado depois do tratamento (Al e Fe).	97
5.39	Consumo de Energia e voltagem versus Tempo sob os melhores parâmetros.	98
5.40	Efeito da geometria dos eletrodos, [surfatante]= 1 g/l, [NaCl]=1 g/l, [óleo]= 1,5 g/l, $d_e = 10$ mm, $\delta = 9,4$ mA/cm ² , CF= eletrodos perfurados, SF= Não perfurados.	99
A.1	Típica curva obtida com a solução padrão de ftalato ácido de potássio	116

Lista de tabelas

2.1	Densidades dos principais óleos presentes numa emulsão, em gr/cm^3	23
3.1	Principais diferenças nos reatores de batelada e contínuos. [53]	47
3.2	Parâmetro SA/V ótimos, encontrados por diversos pesquisadores [53].	48
4.1	Estabilidade das emulsões em relação ao potencial zeta [71].	50
4.2	Experiências realizadas para cada tipo de material de anodo testado	55
5.1	Turbidez e DQO obtida a diferentes concentrações de óleo.	58
5.2	Experiências com anodos de Al, avaliando o efeito da densidade de corrente na eficiência de redução da DQO e turbidez.	59
5.3	Resumo de experiências com eletrodos de ferro, avaliando o efeito da densidade de corrente na eficiência da redução da DQO e turbidez	63
5.4	Consumo de energia usando anodos de alumínio, $t = 60 \text{ min}$, $d_e = 5 \text{ mm}$	67
5.5	Consumo de energia usando anodos de Fe, nas distintas densidades; em 60 min de operação.	68
5.6	Experiências com anodos de Al avaliando a distância entre os eletrodos	68
5.7	Resumo de experiências com eletrodos de Fe avaliando a distância entre os eletrodos	71
5.8	Resumo de experiências eletrodos de Al avaliando a Concentração inicial do óleo	76
5.9	Resumo de experiências eletrodos de Fe avaliando a concentração inicial do óleo	79
5.10	Comportamento do pH para as diferentes densidades de corrente (eletrodos de Alumínio)	83
5.11	Comportamento do pH para as diferentes densidades de corrente usando anodos de ferro	85
5.12	Resumo de experiências com eletrodos de Al, avaliando a relação SA/V para 60 minutos de operação	87
5.13	Alumínio dissolvido em 30 minutos de operação comparado com a relação SA/V.	87
5.14	Resumo de experiências com eletrodos de Fe avaliando a Relação SA/V em 60 minutos de operação	87
5.15	Ferro dissolvido para as distintas relações de SA/V testadas	88
5.16	Dissolução teórica dos anodos até 30 minutos de operação	90
5.17	Alumínio dissolvido, medido experimentalmente, até 30 minutos de operação	91
5.18	Ferro dissolvido até 30 minutos de operação para o uso de três anodos; $9,4 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $d_e = 10 \text{ mm}$.	91
5.19	Experiência com os melhores parâmetros, usando anodos de A; $\delta = 9,4 \text{ mA}/\text{cm}^2$; $d_e = 10$; 60 min.	94

5.20	Experiência com os melhores parâmetros, usando anodos de Fe, e 6 eletrodos; $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$; $d_e = 10$; 60 min.	96
5.21	avaliação da geometria dos eletrodos, com e sem orifícios, usando anodos de Al, 6 eletrodos, $\delta = 9,4 \text{ mA/cm}^2$, $d_e = 10$; 60 min.	99

*Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida e viver com paixão, perder com
classe e vencer com ousadia, porque o mundo
pertence a quem se atreve e a vida é
muito para ser insignificante.*

Charles Spencer, Chaplin, .