

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA

**CONTRIBUIÇÕES AO PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO DO
GÁLIO SOBRE COBRE E ESTUDO DAS INTERFASES Cu/NaOH E
Pt/NaOH NA AUSÊNCIA E PRESENÇA DE ÍONS ACRILATO**

Célia Aparecida Lino dos Santos

Tese de Doutorado

**Orientadora: Prof^ª Dra. Silvia Maria Leite
Agostinho**

São Paulo
2003

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Química por ter me proporcionado este trabalho.

À Prof^a Dr^a Silvia Maria Leite Agostinho pela orientação acadêmica, colaboração, pelo incentivo e entusiasmo em todos os instantes deste trabalho e, sobretudo, pelo suporte emocional que gerou um laço estreito e duradouro de amizade, profissionalismo e respeito. Agradeço ainda, a confiança depositada.

A todos os componentes do Grupo de Eletroquímica II que interagiram com este trabalho, colaborando em todas as etapas. Um grupo de trabalho e de amigos. A vocês: Isis, Juliana, Jocicler, Karen, Lúcia, Maico, Maurício, Mônica, Ruth, Wilder muito obrigado por terem participado da minha formação acadêmica, profissional e, principalmente, por proporcionarem um ambiente de trabalho repleto de companheirismo e respeito.

Ao Prof. Dr. Augusto Agostinho Neto pela sua participação, colaboração e conhecimento.

Aos funcionários deste Instituto: Nivalda, Nivaldo, Paulinho, Francisco e Jaílton.

Ao Prof. Dr. Armi W. Nóbrega do Instituto de Química – Departamento de Química Analítica da Universidade Federal Fluminense pelas sugestões dadas.

Ao Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves da Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Minas - EPUSP coordenador do Projeto Gálio, pelo trabalho em cooperação.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN e à Prof^a Dr^a Elisabete Jorge Pessine, que foi minha orientadora no mestrado e que continua participando da minha formação acadêmica. Aos amigos Kellie e Olandir pelo constante incentivo e amizade.

Ao Prof. Dr. Artur J. Motheo e ao seu aluno de doutorado Rodrigo de Santis Neves, do Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo, pelo trabalho em cooperação.

Ao Prof. Dr. Luís Otávio de Sousa Bulhões e ao pós-doutorando Mauro Coelho dos Santos, do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica da Universidade Federal de São Carlos, pelo trabalho em cooperação.

Aos amigos Gerhard Ett e Isaac Jamil Sayeg.

À minha família pelo constante incentivo e apoio.

A todos que colaboraram direta, ou, indiretamente com este trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de estudos e à FAPESP pelos auxílios concedidos.

**Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Eletroquímica II
sob a orientação da Prof^a Dr^a Silvia Maria Leite Agostinho**

Dedico este trabalho

à minha mãe, *Ana de Andrade Lino*, a quem eu devo tudo

à memória do meu pai, *Leandro José Lino*

ao meu esposo *Luiz* e meus filhos *Leandro e Otávio*

“As tarefas diárias jamais impediram alguém de seguir seus sonhos”

Paulo Coelho

ÍNDICE

Resumo	
Abstract	
Lista de Abreviaturas e Siglas	i
Introdução	iv
Capítulo 1: Revisão Bibliográfica	1
1.1 O ELEMENTO GÁLIO	1
1.2 OCORRÊNCIA NATURAL DO GÁLIO	2
1.3 OBTENÇÃO DO GÁLIO POR ELETRODEPOSIÇÃO	2
1.4 APLICAÇÕES DO GÁLIO	8
1.5 ESTUDOS SOBRE INTERFASES CU/NAOH	9
1.6 ESTUDOS SOBRE A INTERFASE Pt/NAOH	10
1.7 PROPRIEDADES DO ÁCIDO ACRÍLICO	11
1.8 A DUPLA CAMADA ELÉTRICA	12
1.8.1 Descrição qualitativa dos modelos	12
1.8.2 Descrição quantitativa dos modelos	16
1.9 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)	20
1.10 MICROBALANÇA ELETROQUÍMICA DE CRISTAL DE QUARTZO (MECQ)	25
Referências Bibliográficas	29

Capítulo 2: Parte Experimental: Materiais e Métodos	36
2.1 PARTE I	36
2.2 PARTE II	38
2.2.1 Eletrodos	38
2.2.2 Soluções	40
2.2.3 Células Eletroquímicas	41
2.2.4 Equipamentos	45
2.2.5 Tratamento Superficial dos Eletrodos de Trabalho	45
2.2.6 Ensaio Cronoamperométrico	46
2.2.7 Ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	46
Referências Bibliográficas	47
Capítulo 3: Resultados e Discussão: Parte I	48
3.1 ENSAIOS TECNOLÓGICOS	48
3.1.1 Efeito do Complexante EDTA	49
3.1.2 Efeito do Surfatante Dodecilssulfato de Sódio (SDS)	50
3.1.3 Efeito de Tratamento Superficial com Lixas de Diferentes Granulometrias	51
3.1.4 Efeito do Potencial Aplicado	52
3.1.5 Efeito da Natureza do Cátodo	53
3.1.6 Efeito da Temperatura	54
3.1.7 Efeito das Impurezas Presentes no Licor de Bayer	54

3.2 DEFINIÇÃO DO TEMA E DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	56
3.2.1 A Presença ou Não do EDTA	56
3.2.2 O emprego de Tensoativos	56
3.2.3 A Escolha do Tratamento Superficial	57
3.2.4 A Escolha do Potencial	57
3.2.5 A Escolha do Cátodo	57
3.2.6 A Escolha da Temperatura	58
3.2.7 A Escolha da Impureza a Ser Estudada	58
Referências Bibliográficas	59
Capítulo 4: Resultados e Discussão – Parte II	60
4.1 COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO DO COBRE EM MEIO ALCALINO	60
4.1.1 Comparação com a Literatura e Estudo da Interfase Cu/KOH 5,0 mol.L ⁻¹	60
4.1.2 Efeito do Grau de Pureza no Comportamento Eletroquímico do Cobre Metálico em Meios de NaOH 0,1 mol.L ⁻¹ e 5,0 mol.L ⁻¹	65
4.1.3 Efeito dos Óxidos de Cobre Presentes na Superfície do Eletrodo de Cobre 99,999% Sobre a Reação H ₂ O/H ₂ em Meio de NaOH 5,0 mol.L ⁻¹ empregando EDR de Cobre a 16 Hz	76
4.1.4 Ensaios Cronoamperométricos para a Interfase Cu/NaOH 5,0 mol.L ⁻¹	79
4.2 COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO DA PLATINA EM MEIO ALCALINO	83
4.2.1 Estudos Voltamétricos	84

4.2.2 Estudos Cronoamperométricos	86
4.2.3 Estudos por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)	91
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS POR ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA E POR CRONOAMPEROMETRIA	98
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA DCE POR CRONOAMPEROMETRIA PARA A PLATINA E COBRE EM MEIO DE NaOH 5,0 mol.L⁻¹	102
4.5 ESTUDOS ELETROQUÍMICOS DAS INTERFASES Pt/NaOH 5,0 mol.L⁻¹ E Cu/NaOH 5,0 mol.L⁻¹ NA PRESENÇA DE ACRILATO	102
4.5.1 Polarização Linear – Interfase Pt/NaOH	102
4.5.2 Voltametria Cíclica – Interfase Pt/NaOH	104
4.5.3 Cronoamperometria – Interfase Pt/NaOH	105
4.5.4 Estudo dos Sistemas Pt/NaOH 1,0x10 ⁻¹ mol.L ⁻¹ na Ausência e Presença de Acrilato por MECQ	107
4.5.5 Estudo dos Sistemas Cu/NaOH 1,0x10 ⁻¹ mol.L ⁻¹ na Ausência e Presença de Acrilato por MECQ	113
4.6 ELETRODEPOSIÇÃO DE GÁLIO A PARTIR DE NaOH 5,0 mol.L⁻¹/GALATO 5,0x10⁻³ mol.L⁻¹ NA AUSÊNCIA E PRESENÇA DE ACRILATO 1,0x10⁻² mol.L⁻¹	115
4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS ELETRODEPÓSITOS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ANÁLISE POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS)	118
Referências Bibliográficas	122

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 124

5.1 CONCLUSÕES 124

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 126

CURRICULUM VITAE

**CONTRIBUIÇÕES AO PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO DO GÁLIO SOBRE
COBRE E ESTUDO DAS INTERFASES Cu/NaOH E Pt/NaOH NA AUSÊNCIA E
PRESENÇA DE ÍONS ACRILATO**

RESUMO

Interfases Cu/NaOH e Pt/NaOH foram estudadas a 25 oC, a várias concentrações de NaOH, $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ a $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$, empregando técnicas eletroquímicas e não eletroquímicas na ausência e presença do íon acrilato. Os estudos tiveram como objetivo obter informações sobre a dupla camada elétrica (DCE) e sobre a reação $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ empregando cobre como substrato, para um melhor entendimento da eletrodeposição do gálio. Os estudos foram precedidos de ensaios tecnológicos em que as condições experimentais e a natureza dos sistemas a serem estudados foram estabelecidas. Estudos por voltametria cíclica provaram que em NaOH $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$ os processos de oxidação e redução do cobre são qualitativamente semelhantes aos observados em NaOH $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$, mas a velocidade destes processos se torna uma ordem de grandeza maior em NaOH $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$. Ensaio por voltametria linear indicaram que a redução dos óxidos na superfície e a menor pureza do cobre (99,99% comparado a 99,999 %) elevam a velocidade da reação $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$. Estudos cronoamperométricos mostraram a viabilidade do emprego desta técnica nos estudos da DCE da interface Cu/NaOH $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$ na região de potencial em que os processos faradaicos são da ordem de $20 \mu\text{A.cm}^{-2}$ em condições estacionárias. As interfases Cu/NaOH foram comparadas com as interfases Pt/NaOH e os resultados obtidos por cronoamperometria, para platina, foram comparados com os observados por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). O valor de $-158 \text{ mV}/(\text{Hg}/\text{HgO})$ para o potencial de carga zero, determinado por EIE é comparável ao obtido por cronoamperometria ($-125 \text{ mV}/\text{Hg}/\text{HgO}$), mantidos constantes os tratamentos superficiais do eletrodo e a pureza das soluções. A aplicação do modelo de Gouy Chapman para a solução diluída ($10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$), no

potencial de carga zero, permitiu avaliar, conhecida a capacitância da DCE, os valores de capacitância. C_1 , no plano interno de Helmholtz. A partir de C_1 foi possível calcular a constante dielétrica, κ , nesta região, encontrando-se por EIE o valor $\kappa = 13,1$. A aplicação do modelo de Helmholtz às soluções de NaOH $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$ permitiu determinar por cronoamperometria, a constante dielétrica na interfase, tanto para Cu/NaOH $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$ (igual a 44), quanto para Pt/NaOH $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$ (igual a 25). O emprego da microbalança de cristal de quartzo permitiu verificar a adsorção do íon acrilato desde o potencial de circuito aberto. O íon acrilato inibe todos os processos que ocorrem sobre platina (entre $0,4 \text{ V(Hg/HgO)}$ e $-1,0 \text{ V(Hg/HgO)}$) e sobre cobre (entre $-0,8 \text{ V(Hg/HgO)}$ e $-1,6 \text{ V(Hg/HgO)}$). Estudos potenciostáticos sob condições estacionárias mostraram que o acrilato inibe a deposição do gálio sobre cobre em meio de NaOH $5,0 \text{ mol.L}^{-1}$, o que foi verificado por técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e energia dispersiva de raios-X (EDS). Os resultados evidenciaram que o cuidado no emprego do acrilato no processamento da alumina deve ser levado em conta, quando se deseja obter gálio metálico como subproduto.

**CONTRIBUTIONS TO THE ELECTRODEPOSITION PROCESS OF GALLIUM ON
COPPER AND STUDY OF THE INTERPHASES Cu/NaOH AND Pt/NaOH IN THE
ABSENCE AND IN THE PRESENCE OF ACRYLATE IONS**

ABSTRACT

Cu/NaOH and Pt/NaOH interphases have been studied at 25°C, in a concentration range of $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ to 5.0 mol.L^{-1} , using electrochemical and non-electrochemical techniques in the absence and in the presence of acrylate ions. The main goal of this study was to obtain information about the electrical double layer (EDL) and about the reaction $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ using copper as substrate, in order to have a better understanding of gallium electrodeposition. The experimental conditions and the nature of the systems have been defined by technological researches performed previously to these experiments. Cyclic voltammetric studies have proved that both oxidation and reduction processes of copper in $\text{NaOH } 5.0 \text{ mol.L}^{-1}$ are qualitatively similar to those observed in 0.1 mol.L^{-1} but the reaction rate is one order of magnitude higher than in 0.1 mol.L^{-1} . Linear voltammetric experiments have pointed out that the reaction rate of $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ is increased with the decrease in copper purity (99,99% compared to 99,999%) and with the reduction of the oxides on the surface. Chronoamperometric studies have shown its viability on the study of EDL corresponding to Cu/NaOH interphase on the potential region where the faradaic processes are of the order of magnitude of $20 \mu\text{A.cm}^{-2}$ under stationary conditions. Cu/NaOH interphases have been compared to Pt/NaOH interphases and the chronoamperometric results obtained for platinum have been compared to those observed by electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The value of $-158 \text{ mV}/(\text{Hg}/\text{HgO})$ for the zero charge potential calculated by EIS is comparable to the one obtained by chronoamperometry ($-125 \text{ mV}/\text{Hg}/\text{HgO}$) maintaining constants both the electrode surface treatment and the purity of the solutions. The application of the Gouy Chapman model for the more dilute

solution (10^{-3} mol.L⁻¹) at zero charge potential (knowing the EDL capacitance), allowed to evaluate the capacitance values of the Helmholtz internal plane C1. Knowing C1, it was possible to calculate the dielectric constant (κ) in this region by EIS ($\kappa = 13.1$). The application of the Helmholtz model to NaOH 5.0 mol.L⁻¹ solutions allowed to calculate the dielectric constant on the interphase by chronoamperometry for both Cu/NaOH 5.0 mol.L⁻¹ ($\kappa = 44$) and Pt/NaOH 5.0 mol.L⁻¹ ($\kappa = 25$) interphases. The use of electrochemical quartz crystal microbalance permitted to verify the adsorption of acrylate ion from the open circuit potential. Acrylate ion inhibits all the processes that occur over both platinum (from 0.4 V/Hg/HgO to -1.0 V/Hg/HgO) and copper (from -0.8 V/Hg/HgO) to -1.6 V/Hg/HgO). Potentiostatic studies over stationary conditions have shown that acrylate ion inhibits the gallium deposition on copper in 5.0 mol.L⁻¹ medium, which is in agreement with what is observed by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersion spectroscopy (EDS). The results point out that care must be taken when using acrylate on alumina processing if gallium metallic is intended as subproduct.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

γ	tensão superficial
ΔE	variação do potencial aplicado
Δf	variação de frequência de ressonância
Δm	variação de massa
Δq_M	variação de densidade de carga no metal
ϵ_0	permissibilidade no vácuo
η	rendimento de eletrólise
θ	ângulo de contato
Θ	diferença de fase entre o potencial aplicado e a corrente detectada
κ	constante dielétrica do meio
μ_c	módulo de cisalhamento do quartzo
ρ_c	densidade do quartzo
ρ	densidade do mercúrio
ϕ_2	potencial no plano externo de Helmholtz
ag	admissão de gás inerte
b	pendente de Tafel
C	capacidade por unidade de área
C_d	capacidade diferencial
$C_{d,GC}$	capacidade diferencial para o modelo de Gouy-Chapman
$C_{d,H}$	capacidade diferencial para o modelo de Helmholtz
C_{dif}	camada difusa
C_i	camada compacta
CRP	com redução prévia do eletrodo
d	densidade
<i>d</i>	espessura da dupla camada compacta

DCE	dupla camada elétrica
e_{aux}	eletrodo auxiliar
E_{ca}	potencial de circuito aberto
E_{corr}	potencial de corrosão
ECS	eletrodo de calomelano saturado
EDR	eletrodo de disco rotativo
EDS	energia dispersiva de raios-X
E_f	potencial final
E_i	potencial inicial
EIE	espectroscopia de impedância eletroquímica
E_{inv}	potencial de inversão
EPH	eletrodo padrão de hidrogênio
e_{ref}	eletrodo de referência
e_{trab}	eletrodo de trabalho
E_z	potencial de carga zero
f	frequência
f_o	frequência fundamental do cristal
g	constante gravitacional
h	altura da coluna de mercúrio
i_o	densidade de corrente de troca
j	densidade de corrente
j_{max}	densidade de corrente faradaica máxima, na cronoamperometria
$j_{t=0}$	densidade de corrente faradaica no instante zero, na cronoamperometria
k_b	constante de Boltzmann
K	coeficiente de sensibilidade da microbalança
MEQC	microbalança eletroquímica de cristal de quartzo
MEV	microscopia eletrônica de varredura

n_i^0	concentração numérica dos íons i no seio da solução
PEH	plano externo de Helmholtz
PIH	plano interno de Helmholtz
q_M	densidade de carga no metal
q_s	densidade de carga da solução
Q_{Ga}	carga catódica da deposição do gálio
Q_t	carga total
r	raio do capilar
RDH	reação de desprendimento de hidrogênio
R_P	resistência de polarização
R_S	resistência ôhmica da solução
R_{tc}	resistência de transferência de carga
sg	saída de gás inerte
SDS	dodecilssulfato de sódio
SRP	sem redução prévia do eletrodo
t	tempo
t_{max}	tempo quando $j=j_{max}$, na cronoamperometria
T	temperatura
vv	velocidade de varredura
z	valência do íon
Z	impedância
Z_{Im}	componente imaginária da impedância
Z_{Re}	componente real da impedância

INTRODUÇÃO

O gálio desperta interesse por apresentar aplicabilidade tecnológica de grande importância na atualidade. Ele forma compostos com propriedades semicondutoras, por exemplo GaP, GaAs, GaN, os quais são empregados em dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos: microchips para computadores; circuitos eletrônicos integrados; LED's – diodos emissores de luz e células fotoelétricas.

O elemento gálio ocorre naturalmente disperso em alguns minérios e apresenta-se em baixas concentrações. A bauxita tem se mostrado o minério economicamente viável para se extrair o gálio, uma vez que este pode ser eletrorrecuperado a partir da solução resultante da precipitação da alumina, uma das etapas da indústria do alumínio.

A obtenção do gálio metálico a partir do licor de Bayer apresenta algumas dificuldades devido a contaminantes inorgânicos e orgânicos inerentes à própria bauxita, ou, compostos orgânicos adicionados durante o processamento do minério. Além disto, a redução do íon galato ocorre concomitante à reação H_2O/H_2 , o que leva a baixos rendimentos de eletrodeposição.

Este trabalho tem por objetivo estudar dois fatores que influenciam a eletrodeposição de gálio em meio alcalino, a reação de desprendimento de hidrogênio e a presença de contaminantes orgânicos.

Estudou-se o efeito da presença de óxidos de cobre sobre a reação H_2O/H_2 e também, a influência do íon acrilato sobre a mesma reação, nas interfases Cu/NaOH 0,1 mol.L⁻¹ e Cu/NaOH 5,0 mol.L⁻¹. Dentro deste contexto, desenvolveu-se um estudo com os sistemas Cu/NaOH 0,1 mol.L⁻¹ e Cu/NaOH 5,0 mol.L⁻¹ na ausência e presença do íon acrilato. O sistema Cu/NaOH

0,1 mol.L⁻¹ foi estudado empregando-se a microbalança eletroquímica de cristal de quartzo com o intuito de se verificar a existência de processos de adsorção do ânion orgânico sobre o substrato. Para o sistema Cu/NaOH 5,0 mol.L⁻¹ utilizou-se a cronoamperometria com o objetivo de se verificar a viabilidade de estudos sobre dupla camada elétrica na ausência e presença do íon acrilato.

Depósitos de gálio foram obtidos sobre substrato de cobre em meio de NaOH 5,0 mol.L⁻¹, sob condições potencioestáticas, a 25 °C, na ausência e presença do íon acrilato. O cobre empregado como substrato e o eletrodepósito de gálio foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura e por energia dispersiva de raios-X. Estas técnicas foram empregadas como técnicas complementares no estudo do efeito do grau de pureza no comportamento eletroquímico do cobre, em meios de NaOH 0,1 mol.L⁻¹ e 5,0 mol.L⁻¹.

Em paralelo estudaram-se os seguintes sistemas: Pt/NaOH 0,1 mol.L⁻¹ na ausência e presença do íon acrilato utilizando-se a microbalança eletroquímica de cristal de quartzo; Pt/NaOH 1,0x10⁻³ mol.L⁻¹ – 5,0 mol.L⁻¹ por cronoamperometria visando estudos sobre dupla camada elétrica e determinação do potencial de carga zero; Pt/NaOH 1,0x10⁻³ – 1,0x10⁻¹ mol.L⁻¹ por espectroscopia de impedância eletroquímica para a determinação do potencial de carga zero. Os estudos feitos com platina foram desenvolvidos para dar suporte aqueles realizados com cobre, visto que a platina é um metal nobre e o seu comportamento eletroquímico está melhor estabelecido com um razoável número de referências bibliográficas para os meios estudados, exceto para o meio de NaOH 5,0 mol.L⁻¹.

Este trabalho apresenta a seguinte estrutura:

CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma visão geral sobre o elemento gálio, abordando a sua descoberta, ocorrência, obtenção e aplicação, concomitante a uma revisão bibliográfica dos trabalhos localizados na literatura que tratam da eletrodeposição do gálio, dos sistemas estudados Cu/NaOH, Pt/NaOH e breves revisões sobre a estrutura da dupla camada elétrica, espectroscopia de impedância eletroquímica e microbalança eletroquímica de cristal de quartzo.

CAPÍTULO 2: PARTE EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição dos materiais e da metodologia empregada durante o desenvolvimento do projeto de doutorado.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS E DISCUSSÃO – PARTE I

Exposição e discussão dos resultados experimentais obtidos durante os ensaios preliminares que foram realizados para a definição do tema do doutorado.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO – PARTE II

Apresentação e discussão dos resultados experimentais referentes ao tema da tese de doutorado.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Compilação das conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.