

Universidade Estadual de Campinas - Unicamp
Instituto de Química
Departamento de Físico-Química
Dissertação de Mestrado



ESTUDO DA ELETRIZAÇÃO E DO DECAIMENTO DE
POTENCIAIS ELETROSTÁTICOS EM POLÍMEROS
ISOLANTES



1150065292



IQ

T/UNICAMP R147a

Autor: Alex Freitas Ramos

Orientador: Fernando Galembeck

Campinas – 2005

UNIDADE	IQ
Nº CHAMADA	
	T/UNICAMP
	R147e
V	EX
TOMBO BC/	85295
PROC.	16-P.0008625
C	☐
D	☒
PREÇO	110
DATA	11/08/05
Nº CPD	

BIBID- 360445

R147e Ramos, Alex Freitas.
Estudo da eletrização e do decaimento de potenciais eletrostáticos em polímeros isolantes / Alex Freitas Ramos. -- Campinas, SP: [s.n], 2005.

Orientador: Fernando Galembeck.

Dissertação – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química.

1. Eletrostática. 2. Decaimento de potencial.
3. Isolante. 4. Polietileno. I. Galembeck, Fernando.
II. Instituto de Química. III. Título.

Dedico este trabalho a minha
esposa, companheira e
amiga Laura e a
minha filha
Beatriz

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa de estudos.

Ao meu orientador Fernando Galembeck pelo seu esforço durante a realização deste trabalho e por tudo que me ensinou.

Aos colegas de trabalho pelo convívio e amizade, em especial à Yara.

A todos os meus amigos, em especial: Anderson (Magno), André (Calango), Francisco (Chico), Gedeon, Leandro (Martinez), Ney, Paulo, Ricardo (Bugiu) e Rogério (Nonô) por me ouvirem, pelo apoio e pelos momentos de descontração.

Aos meus sogros Eurípedez e Maria Helena pelo carinho.

Aos meus pais, Aldo e Santa, e irmãos, Régis e Priscila, pelas minhas conquistas e por sempre acreditarem em mim.

A minha esposa Laura pela dedicação.

A minha filha Beatriz pelos seus sorrisos.

Currículo

Nome: Alex Freitas Ramos

Data de nascimento: 30/03/1981

Nacionalidade: brasileira

Endereço: Rua Constância Reis Lopes, 246, Jardim Independência, Campinas, S.P. – CEP: 13084-490.

Telefone: 19 97092504 / 3289 7708

E-mail: lex@iqm.unicamp.br

Formação:

Mestrado em Química na área de Físico-Química no Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, bolsa CAPES.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Galembeck.

Ingresso: março de 2003

Defesa: 24 de fevereiro de 2005

Graduação em Química (Bacharelado) na Universidade Estadual de Campinas - Unicamp.

Início: 1999

Término: 2002

Aprimoramento profissional:

Programa de Estágio Docente – PED

Estagiário junto à disciplina QF 732 – Físico-Química Experimental II

Entidade: Unicamp

Período: março de 2004 a julho de 2004.

Programa de Apoio Didático - PAD

Auxiliar Didático junto à disciplina QG 102 - Química Experimental I.

Entidade: Unicamp

Período: agosto de 2002 a dezembro de 2002.

Iniciação Científica na área de Físico-Química com o projeto “Estudo Teórico do Efeito Raman Pré-Ressonante de Íon Nitrato em Solução”, bolsa PIBIC/Unicamp.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Antonio Muniz Vazquez.

Período: agosto de 2001 a julho de 2002.

Técnicas de Biologia Molecular para Determinação de Paternidade.

Entidade: USP – São Paulo

Período: janeiro de 2002.

Carga horária: 30 horas.

Participação em eventos científicos:

11th International Conference on Surface and Colloid Science, Foz do Iguaçu – PR.

Apresentação do pôster “Polymer Electric Charging: The Role of Sorption from the Gas Phase”.

Período: 15 a 19 de setembro de 2003.

Oficina sobre Nano Ciência e Tecnologia da Unicamp, Campinas – SP.

Período: 5 e 6 de junho de 2003.

X Congresso Interno de Iniciação Científica da Unicamp, Campinas – SP.

Apresentação do pôster “Estudo Teórico do Efeito Raman Pré-Ressonante do Íon Nitrato em Solução”.

Período: 27 e 28 de setembro de 2002.

25^a Reunião Anual da SBQ, Poços de Caldas – MG.

Apresentação de pôster “Estudo Teórico do Efeito Raman Pré-Ressonante do Íon Nitrato em Solução”.

Período: 20 a 23 de maio de 2002.

Resumo

ESTUDO DA ELETRIZAÇÃO E DO DECAIMENTO DE POTENCIAIS ELETROSTÁTICOS EM POLÍMEROS ISOLANTES

Desde a descoberta da Eletrostática, há mais de 2500 anos, muito conhecimento foi adquirido e importantes aplicações desenvolvidas, como a eletrofotografia. No entanto, ainda existem importantes perguntas sem resposta, principalmente quando materiais isolantes estão envolvidos. Neste trabalho, estudou-se a eletrização e o decaimento de potenciais eletrostáticos em polímeros isolantes apolares, principalmente polietileno. A eletrização das amostras foi feita, principalmente, através de um fluxo de ar ionizado positiva ou negativamente e os potenciais nas amostras foram determinados pelo método de Kelvin com uma resolução espacial de 6,4 mm e registrados em função do tempo. Foi observado que os polímeros utilizados podem ser facilmente eletrizados de diversas maneiras, com cargas positivas, negativas ou ambas. Em polietileno observou-se que a eletrização pode ser realizada de maneira controlada sendo possível a criação de domínios ou gradientes elétricos. Além disso, foi observado que o tempo de persistência dos potenciais eletrostáticos depende do método de eletrização e que diferentes regiões da superfície desse polímero dissipam os potenciais de maneiras diferentes. Também foi mostrado que os potenciais na superfície do polietileno podem ser dissipados mais rapidamente imergindo as amostras em etanol ou clorofórmio e deixando-as secar sob atmosfera ambiente.

Abstract

STUDY OF CHARGING AND ELECTROSTATIC POTENTIAL DECAY IN INSULATOR POLYMERS

Since the discovery of electrostatic phenomena, more than 2500 years ago, much knowledge has been acquired and important applications have been developed, as the electrophotography. However, important unanswered questions still persist, mainly when insulating materials are involved. In this work, electric potential build-up and decay in apolar insulating polymers, mainly polyethylene, were studied. Samples were charged, mainly, using a flow of positive or negative ionized air. The potentials in the charged samples were determined by Kelvin method with spatial resolution of 6.4 mm and they were registered as a function of time. The results showed that the used polymers can be easily charged by using different techniques, with positive charges, negative charges or both. In polyethylene, controlled charging leads to the creation of electric domains or gradients. Moreover, the persistence time of the electrostatic potentials depends on the charging method and different regions of the polymer surface dissipate the potentials at different rates. The potentials in polyethylene's surface are quickly dissipated by immersing the samples into ethanol or chloroform and leaving them to dry under room atmosphere.

Índice

	Lista de figuras.....	xix
1	Introdução.....	1
2	Parte Experimental.....	5
2.1	As amostras de polímero.....	5
2.2	Ambiente e sistema de medidas.....	6
2.3	Os experimentos.....	10
2.3.1	Eletrização das amostras.....	10
2.3.2	Registro dos potenciais eletrostáticos.....	11
2.3.2.1	Erro nas medidas.....	12
2.3.3	Imersão em líquidos.....	14
2.4	Preparação da solução aquosa de sacarose e glicerol.....	15
3	O método de Kelvin.....	16
4	Resultados.....	21
4.1	Resultados preliminares.....	21
4.1.1	Eletrização de polímeros isolantes apolares.....	21
4.1.2	Indução de cargas na placa de alumínio.....	24
4.2	Experimentos com polietileno.....	28
4.2.1	Eletrização do polietileno.....	28
4.2.2	Monitoramento dos potenciais eletrostáticos.....	32
4.2.2.1	Experimentos com descargas positivas.....	32
4.2.2.2	Experimentos com descargas negativas.....	42
4.2.3	Eletrização pelo atrito com papel.....	45
4.2.4	Dissipação dos potenciais com imersão em líquidos.....	48
4.2.4.1	Imersão em água.....	50
4.2.4.2	Imersão em etanol.....	52
4.2.4.3	Imersão em clorofórmio.....	54
4.2.5	Discussão.....	56
5	Conclusão.....	60
6	Referências.....	62
	Apêndice A.....	66
	Apêndice B.....	69
	Apêndice C.....	72
	Apêndice D.....	75
	Apêndice E.....	78
	Apêndice F.....	81
	Apêndice G.....	84
	Apêndice H.....	87

Lista de figuras

1.1	Esquema mostrando a transferência de cargas entre metais ou semicondutores durante o contato. O material que possui menor função de trabalho transfere elétrons para o material que possui maior função de trabalho até que os níveis de Fermi de ambos tornem-se coincidentes. a) diagramas de energia antes do contato, b) diagramas de energia após o contato.....	2
2.1	Peças de polímero sobre uma placa de alumínio.....	5
2.2	Caixa de alumínio utilizada para guardar as amostras.....	6
2.3	Câmara de aço inoxidável: a) vista pelo lado de fora e b) vista do interior com os motores e a sonda.....	7
2.4	Sonda de Kelvin utilizada para detecção dos potenciais eletrostáticos.....	8
2.5	Motores utilizados para movimentação da sonda.....	8
2.6	Voltímetro ligado ao computador.....	9
2.7	Foto mostrando o interior da câmara de medidas com o sistema de medidas montado pronto para o início de um experimento.....	9
2.8	Dispositivo antiestático Zerostat utilizado na eletrização das amostras.....	11
2.9	Foto mostrando o sentido de varredura dos potenciais.....	12
2.10	Mapas de distribuição de potenciais mostrando os pontos com erro na medida dos potenciais. a) amostra eletrizada com cargas positivas, b) amostra eletrizada com cargas negativas. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	13
3.1	Esquema mostrando a formação de um capacitor de placas paralelas pela sonda de Kelvin, eletrodo 1, e pela superfície que está sendo investigada, eletrodo 2. V_1 é a diferença de potencial entre o eletrodo 1 e a terra, V_2 é a diferença de potencial entre o eletrodo 2 e a terra e V é a diferença de potencial entre os eletrodos do capacitor.....	16
4.1	Mapa de distribuição de potenciais mostrando a eletrização de uma amostra de polietileno, marcada em vermelho, devido ao toque com uma pinça de aço inoxidável e uma pinça de teflon.....	22
4.2	Mapas de distribuição de potenciais mostrando a eletrização de um filme de poliestireno durante sua secagem.....	23
4.3	Mapas de distribuição de potenciais mostrando a eletrização de um filme de poliestireno durante sua secagem.....	24
4.4	a) Material condutor isolado. b) Polarização do material condutor após a aproximação de um corpo isolante eletrizado com cargas negativas.....	25

4.5	Mapas de distribuição de potenciais de um experimento onde foram aplicadas várias descargas negativas com o dispositivo antiestático em uma amostra de polietileno para mostrar a indução na placa de alumínio. a) amostra no centro da placa de alumínio, b) amostra na parte superior da placa de alumínio, c) placa de alumínio sem a amostra e d) placa de alumínio sem a amostra e desconectada do aterramento. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	27
4.6	Mapas de distribuição de potenciais mostrando a eletrização de polietileno com cargas positivas em a), negativas em b), e com ambas em c). A amostra de polietileno está marcada em vermelho.....	28
4.7	Mapa de distribuição de potenciais obtido em um experimento onde foi aplicada 1 descarga negativa com o dispositivo antiestático sobre uma amostra de polietileno que estava coberta com um anteparo vazado de papel-alumínio. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	30
4.8	Mapa de distribuição de potenciais obtido em um experimento onde foi aplicada 1 descarga positiva com o dispositivo antiestático sobre uma amostra de polietileno que estava coberta com um anteparo vazado de polietileno. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	30
4.9	Mapa de distribuição de potenciais de um experimento no qual a amostra de polietileno foi coberta com um anteparo de papel-alumínio com dois furos. Descargas positivas foram aplicadas sobre um furo enquanto o outro estava coberto e descargas negativas foram aplicadas sobre o segundo furo enquanto o primeiro estava coberto. A posição da amostra está marcada em vermelho...	31
4.10	Curvas de decaimento de quatro experimentos onde a amostra I foi eletrizada com descargas positivas aplicadas com o dispositivo antiestático a 10 cm de altura sobre o centro da amostra. a) aplicação de 2 descargas b) aplicação de 2 descargas c) aplicação de 1 descarga d) aplicação de 2 descargas.....	33
4.11	Mapa de distribuição de potenciais inicial de um experimento no qual 2 descargas positivas foram aplicadas com o dispositivo antiestático a 10 cm de altura sobre o centro da amostra (ver figura 4.10a). As regiões destacadas são aquelas onde o eletrodo está somente sobre a amostra, cuja posição está marcada em vermelho.....	34
4.12	Curva de decaimento da região I mostrada na figura 4.11.....	35
4.13	Curva de decaimento da região II mostrada na figura 4.11.....	35
4.14	Curva de decaimento da região III mostrada na figura 4.11.....	35
4.15	Curva de decaimento da região IV mostrada na figura 4.11.....	35
4.16	Curva de decaimento da região V mostrada na figura 4.11.....	35
4.17	Curva de decaimento da região VI mostrada na figura 4.11.....	35
4.18	Curva de decaimento da região VII mostrada na figura 4.11.....	36
4.19	Curva de decaimento da região VIII mostrada na figura 4.11.....	36

4.20	Curva de decaimento da região IX mostrada na figura 4.11.....	36
4.21	Curva de decaimento da região X mostrada na figura 4.11.....	36
4.22	Curva de decaimento da região XI mostrada na figura 4.11.....	36
4.23	Curva de decaimento da região XII mostrada na figura 4.11.....	36
4.24	Curva de decaimento da região XIII mostrada na figura 4.11.....	37
4.25	Curva de decaimento da região XIV mostrada na figura 4.11.....	37
4.26	Derivada do potencial eletrostático em função do tempo. a) regiões VII e XIII (ver figuras 4.11, 4.18 e 4.24), b) regiões X e XI (ver figuras 4.11, 4.21 e 4.22).....	38
4.27	Derivadas das curvas de decaimento da região XIII obtidas nos experimentos citados na figura 4.10. Experimento <i>a</i> , figura 4.10a; experimento <i>b</i> , figura 4.10b; experimento <i>c</i> , figura 4.10c; experimento <i>d</i> , figura 4.10d.....	39
4.28	Curva de decaimento geral obtida em experimento onde a amostra II foi eletrizada com 1 descarga positiva gerada pelo dispositivo antiestático e aplicada a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.....	40
4.29	Mapa de distribuição de potenciais inicial de um experimento onde 1 descarga positiva foi aplicada com o dispositivo antiestático a 10 cm de altura sobre o centro da amostra (ver figura 4.28). As regiões destacadas são aquelas nas quais o eletrodo está somente sobre a amostra, cuja posição está marcada em vermelho.....	41
4.30	Derivada da curva de decaimento das regiões VI, VIII e IX (ver figura 4.29)..	41
4.31	Gráficos de todos os pontos obtidos em dois experimentos realizados com a amostra I, a) e b), e um experimento realizado com a amostra II, c). a) 1 descarga negativa aplicada a 20 cm de altura sobre o centro da amostra, b) 1 descarga negativa aplicada a 17 cm de altura sobre o centro da amostra, c) 1 descarga negativa aplicada a 17 cm de altura sobre o centro da amostra.....	43
4.32	Derivadas de curvas de decaimento obtidas nos experimentos citados na figura 4.31. Experimento <i>a</i> , figura 4.31a; experimento <i>b</i> , figura 4.31b; experimento <i>c</i> , figura 4.31c.....	44
4.33	Primeiro mapa de distribuição de potenciais obtido após uma amostra de polietileno ser atritada com papel. A posição da amostra está mostrada em vermelho.....	45
4.34	Potenciais em função do tempo gerados em polietileno pelo atrito com papel. O ambiente de medidas foi sujeito a várias alterações da umidade relativa: I) 45 a 65 %; II) 42,0 %, com fluxo de argônio; III) 62,5 %, com fluxo de argônio; IV, V e VI) acima de 90 %; VII) 39,5 %, com fluxo de argônio; VIII) 58,5 %; IX) 35,0 %, com fluxo de argônio. As linhas vermelhas marcam o momento em que se iniciou a alteração da umidade relativa no interior da câmara, em algumas etapas a câmara precisou ser aberta.....	46

4.35	Curva de decaimento e derivada das regiões destacadas na figura 4.33. a) região I, b) região II, c) região III, d) região IV, e) região V.....	49
4.36	Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com o dispositivo antiestático antes e depois de ser imersa em água deionizada. a) amostra eletrizada com descargas positivas antes da imersão, b) amostra eletrizada com descargas positivas depois da imersão, c) amostra eletrizada com descargas negativas antes da imersão, d) amostra eletrizada com descargas negativas depois da imersão. Os mapas obtidos depois da imersão foram registrados após a secagem da água que ocorreu em aproximadamente 2 horas. A posição da amostra está marcada em vermelho..	51
4.37	Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas positivas do dispositivo antiestático antes e depois da imersão em etanol. O mapa feito depois da imersão foi registrado após a secagem do álcool, que ocorreu em menos de 9,5 minutos. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	52
4.38	Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas negativas do dispositivo antiestático antes e depois da imersão em etanol. O mapa feito depois da imersão foi registrado após a secagem do álcool, que ocorreu em menos de 9,5 minutos. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	53
4.39	Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas positivas geradas pelo dispositivo antiestático antes e depois da imersão em clorofórmio. O mapa feito após a imersão foi registrado depois da secagem do clorofórmio, que ocorreu em menos de 20 segundos. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	54
4.40	Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas negativas geradas pelo dispositivo antiestático antes e depois da imersão em clorofórmio. O mapa feito após a imersão foi registrado depois da secagem do clorofórmio, que ocorreu em menos de 20 segundos. A posição da amostra está marcada em vermelho.....	55
4.41	Esquema mostrando a hipótese de dissipação das cargas pela migração dos portadores de carga para a placa de alumínio.....	57
A.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	66
A.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	66
A.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	66
A.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	67
A.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	67
A.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	67
A.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	67
A.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	67

A.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	67
A.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	68
A.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	68
A.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	68
A.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	68
A.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	68
A.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	68
B.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	69
B.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	69
B.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	69
B.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	70
B.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	70
B.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	70
B.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	70
B.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	70
B.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	70
B.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	71
B.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	71
B.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	71
B.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	71
B.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	71
B.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	71
C.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	72
C.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	72
C.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	72
C.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	73
C.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	73
C.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	73
C.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	73
C.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	73
C.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	73
C.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	74

C.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	74
C.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	74
C.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	74
C.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	74
C.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	74
D.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	75
D.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	75
D.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	75
D.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	76
D.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	76
D.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	76
D.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	76
D.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	76
D.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	76
D.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	77
D.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	77
D.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	77
D.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	77
D.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	77
D.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	77
E.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	78
E.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	78
E.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	78
E.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	79
E.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	79
E.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	79
E.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	79
E.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	79
E.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	79
E.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	80
E.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	80
E.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	80

E.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	80
E.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	80
E.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	80
F.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	81
F.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	81
F.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	81
F.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	82
F.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	82
F.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	82
F.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	82
F.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	82
F.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	82
F.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	83
F.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	83
F.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	83
F.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	83
F.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	83
F.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	83
G.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	84
G.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	84
G.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	84
G.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	85
G.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	85
G.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	85
G.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	85
G.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	85
G.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	85
G.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	86
G.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	86
G.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	86
G.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	86
G.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	86

G.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	86
H.1	Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.....	87
H.2	Curva de decaimento e derivada da região I.....	87
H.3	Curva de decaimento e derivada da região II.....	87
H.4	Curva de decaimento e derivada da região III.....	88
H.5	Curva de decaimento e derivada da região IV.....	88
H.6	Curva de decaimento e derivada da região V.....	88
H.7	Curva de decaimento e derivada da região VI.....	88
H.8	Curva de decaimento e derivada da região VII.....	88
H.9	Curva de decaimento e derivada da região VIII.....	88
H.10	Curva de decaimento e derivada da região IX.....	89
H.11	Curva de decaimento e derivada da região X.....	89
H.12	Curva de decaimento e derivada da região XI.....	89
H.13	Curva de decaimento e derivada da região XII.....	89
H.14	Curva de decaimento e derivada da região XIII.....	89
H.15	Curva de decaimento e derivada da região XIV.....	89

1) Introdução

Os fenômenos eletrostáticos começaram a ser conhecidos há 2500 anos. Os primeiros relatos foram feitos por Thales de Mileto. Esses relatos descreviam que quando diferentes materiais eram colocados em contato e separados, observava-se que partículas em suas vizinhanças movimentavam-se^(1, 2).

A maneira mais simples de eletrizar um material é através do contato, ou seja, através da geração de cargas triboelétricas. A triboeletrização, a transferência de cargas de um material para outro quando eles são colocados em contato e separados, fenômeno descoberto há muito tempo e, hoje, bem difundido, já foi bastante estudado e é bem compreendido em metais e semicondutores. No entanto, em materiais isolantes ainda restam muitas perguntas sem resposta: não se conhece a natureza dos portadores de carga e não há nenhum consenso sobre os mecanismos de eletrização e dissipação de cargas.

Em metais e semicondutores, sabe-se que a eletrização pelo contato ocorre devido à transferência de elétrons do material que possui menor função de trabalho para o material que possui maior função de trabalho até que os níveis de Fermi desses materiais atinjam o equilíbrio e fiquem com a mesma energia⁽³⁻⁶⁾, como mostra a figura 1.1.

Na figura 1.1a tem-se o diagrama de energia simplificado de estados eletrônicos de dois metais A e B antes de serem colocados em contato. Nesses diagramas, E_V é o nível de vácuo, E_F é o nível de Fermi e Φ é a função de trabalho. A função de trabalho de um material é igual à diferença de energia entre o nível de vácuo e o nível de Fermi do material.

Na figura 1.1b, tem-se os mesmos diagramas após o contato e separação dos metais. Elétrons foram transferidos do metal A para o metal B até que seus níveis de Fermi ficassem com a mesma energia. Também se observa uma diminuição na energia do nível de vácuo do metal A, sendo que essa queda de energia é igual a $\Phi_B - \Phi_A$.

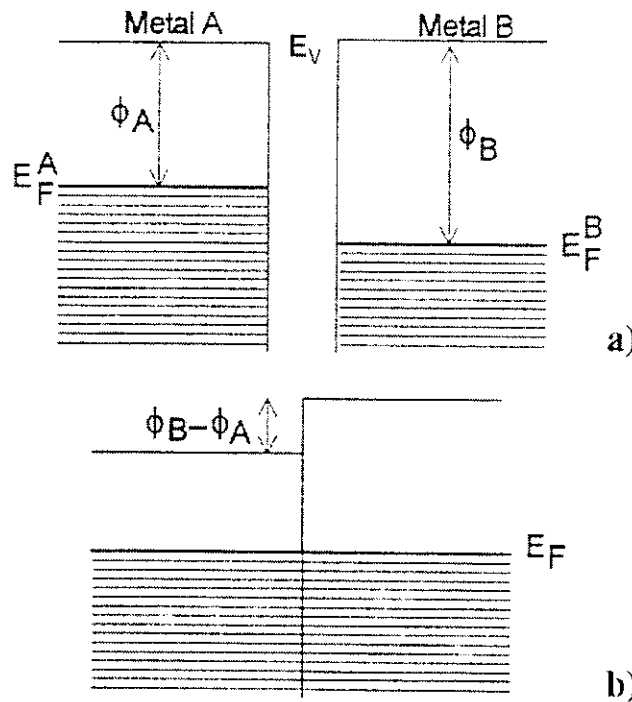


Figura 1.1: Esquema mostrando a transferência de cargas entre metais ou semicondutores durante o contato. O material que possui menor função de trabalho transfere elétrons para o material que possui maior função de trabalho até que os níveis de Fermi de ambos tornem-se coincidentes. **a)** diagramas de energia antes do contato, **b)** diagramas de energia após o contato.

Em isolantes, ainda não existe um modelo que explique todas as observações experimentais^(3, 7). Inicialmente, tentou-se explicar a eletrização observada no contato entre isolantes e metais pela transferência de elétrons, como no contato metal-metal⁽³⁾. Posteriormente, obtiveram-se evidências de

que a eletrização de polímeros também ocorre pela transferência de íons quando sais com íons móveis estão presentes no polímero⁽⁷⁾.

Além da eletrização, existem as descargas eletrostáticas (ESD), que também são assunto de muitos trabalhos. Essas descargas ocorrem quando o campo elétrico nas vizinhanças de um objeto eletrizado é alto o suficiente para causar uma ruptura elétrica no ambiente em que ele se encontra, normalmente o ar⁽⁴⁾.

As descargas eletrostáticas estão presentes no cotidiano das pessoas, pode-se percebê-las quando se leva um choque ao tocar um automóvel ou quando estalos são ouvidos ao retirar-se um agasalho de lã ou nos raios que ocorrem durante as tempestades. Além disso, essas descargas podem ser responsáveis por desde danos a componentes eletrônicos até graves acidentes com perda de vidas, como a explosão de complexos industriais e reservatórios de combustível^(1, 4, 8).

Além do conhecimento acumulado, várias aplicações importantes foram desenvolvidas e continuam sendo melhoradas com os estudos sobre a Eletrostática. Dentre essas aplicações pode-se citar: a eletrofotografia, o revestimento (pintura) eletrostático, a precipitação eletrostática, a separação eletrostática, a dieletroforese, os motores eletrostáticos e os geradores eletrostáticos^(1, 4). Além disso, a Eletrostática, segundo G. S. P. Castle⁽⁹⁾, está encontrando novas aplicações nos Sistemas Microeletromecânicos (MEMS), na Biotecnologia, na Nanotecnologia, no trabalho com partículas ultrafinas e no desenvolvimento espacial.

Em trabalho realizado neste laboratório⁽¹⁰⁾, foi investigada a distribuição de potenciais eletrostáticos em poli(estireno-co-hidroxietilmetacrilato) (PS-HEMA), polietileno e polipropileno através de Microscopia de Varredura de Sonda com imagens de topografia (AFM) e potencial elétrico (SEPM) das

amostras. Foi demonstrado que a distribuição de potenciais no PS-HEMA é devida à organização das partículas de látex em estruturas caroço-casca com grupos sulfato no interior da partícula e íons potássio na superfície da partícula^(11, 12). Foi também observado que polímeros apolares apresentam uma distribuição de potenciais caracterizada por grandes gradientes elétricos, cujos portadores de carga não são conhecidos. Em outro trabalho realizado recentemente⁽¹³⁾ estudou-se o padrão de potenciais elétricos em amostras formadas por eletrodos de ouro interdigitados formados sobre uma camada de sílica; observou-se através de imagens de AFM e SEPM que a camada de sílica entre dois eletrodos polarizava-se quando uma diferença de potencial era aplicada nos eletrodos e atribuiu-se esse comportamento à migração de prótons (H⁺) dos grupos silanóis para o eletrodo negativo.

Experimentos preliminares, realizados neste laboratório, mostraram que peças de termoplásticos de dimensões macroscópicas também apresentam gradientes de potencial eletrostático entre domínios com dimensões de milímetros e centímetros. Neste trabalho, a formação e dissipação desses potenciais foram investigadas de maneira sistemática, utilizando uma nova metodologia.

2) Parte Experimental

2.1) As amostras de polímero

Nesse trabalho foram utilizadas peças de polipropileno e polietileno produzidas em uma injetora a partir de “pellets” dos polímeros com a forma de paralelepípedo e dimensões de $(12,46 \pm 0,05)$ cm x $(1,30 \pm 0,04)$ cm x $(0,34 \pm 0,01)$ cm (figura 2.1). As peças foram feitas de polietileno de baixa densidade da Dow Química e polipropileno da Polibrasil.

Também foram utilizados filmes de poliestireno produzidos pela secagem de uma solução 30 % de poliestireno (Rohm and Haas) em tolueno (Vetec).

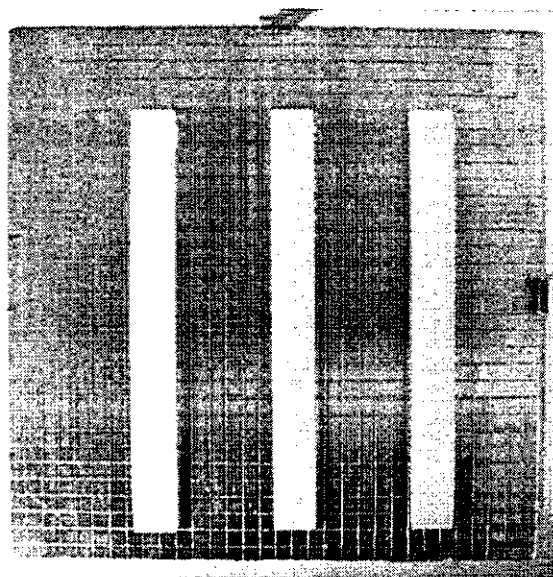


Figura 2.1: Peças de polímero sobre uma placa de alumínio.

As amostras foram mantidas guardadas em uma caixa de alumínio, mostrada na figura 2.2, e, antes da utilização das peças de polímero nos

experimentos, elas foram lavadas com água e detergente líquido e enxaguadas com água destilada e água deionizada.

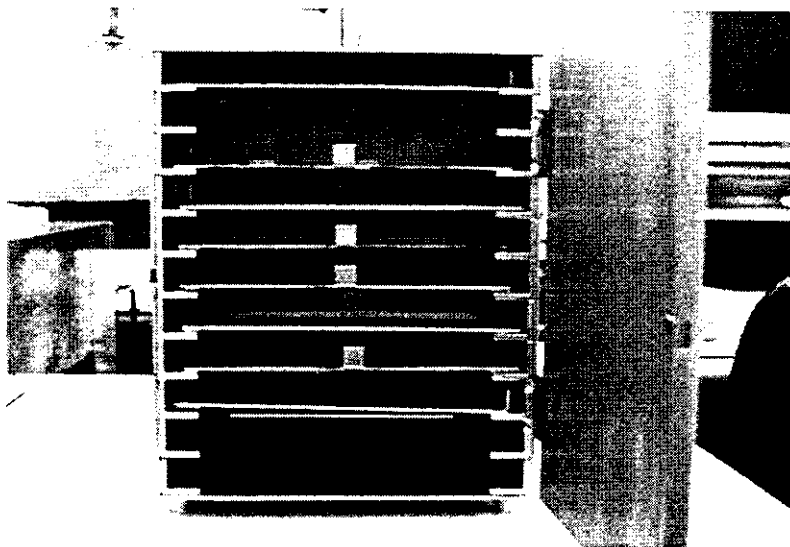


Figura 2.2: Caixa de alumínio utilizada para guardar as amostras.

2.2) Ambiente e sistema de medidas

As medidas foram realizadas em uma câmara de aço inoxidável cujo volume é aproximadamente 107 litros (figura 2.3). A realização dos experimentos no interior dessa câmara facilita o controle da umidade relativa, além das amostras ficarem protegidas de poeira. Para controlar a umidade relativa dentro da câmara, frascos com solução aquosa de sacarose e glicerol, cuja preparação é descrita na seção 2.4, são colocados em seu interior. A temperatura do ambiente de medidas é mantida a $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ por um aparelho de ar-condicionado.

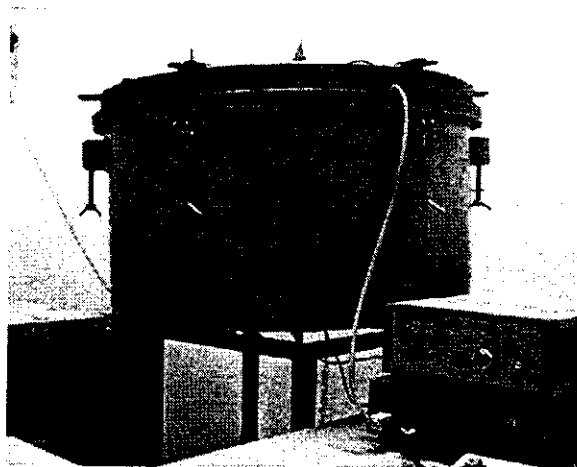


Figura 2.3a

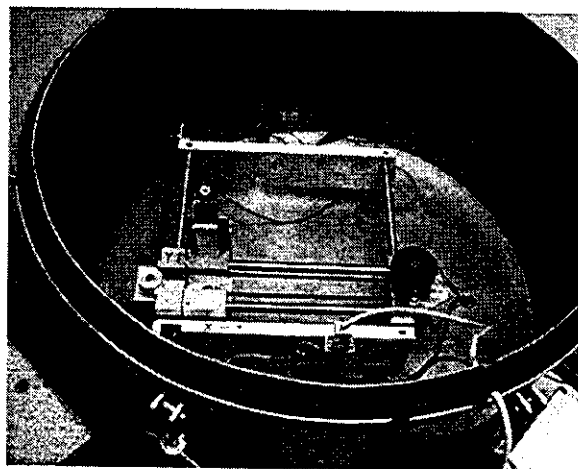


Figura 2.3b

Figura 2.3: Câmara de aço inoxidável: a) vista pelo lado de fora e b) vista do interior com os motores e a sonda.

A temperatura e a umidade relativa na câmara foram medidas com um termo-higrômetro digital marca Minipa modelo MTH-1380 e registradas em função do tempo por um computador através do programa “SE310”, adquirido juntamente com o termo-higrômetro.

Os potenciais eletrostáticos nas amostras são medidos pelo do método de Kelvin com uma sonda Trek modelo 3250 (figura 2.4) e um voltímetro eletrostático Trek modelo 320C, cuja faixa de medida vai de -200 a +200 V. A sonda está acoplada a motores que a movimentam no plano x-y (figura 2.5). Esses motores são controlados por um computador através do programa “Mesaxy” (figura 2.6), desenvolvido pela Optron Micromecânica Óptica Ltda. A resolução espacial das medidas é determinada pelo diâmetro do eletrodo da sonda que é igual a 6,35 mm.

No fundo da câmara são colocadas placas de vidro horizontais e, sobre elas, coloca-se uma placa de alumínio. A placa de alumínio possui riscos na superfície que formam uma grade com quadrados com 0,5 cm de lado para

facilitar o posicionamento das amostras (ver figura 2.1). A câmara e a placa de alumínio são aterradas em comum com o aterramento do voltímetro. Posiciona-se a amostra sobre a placa de alumínio e inicia-se o experimento (figura 2.7).

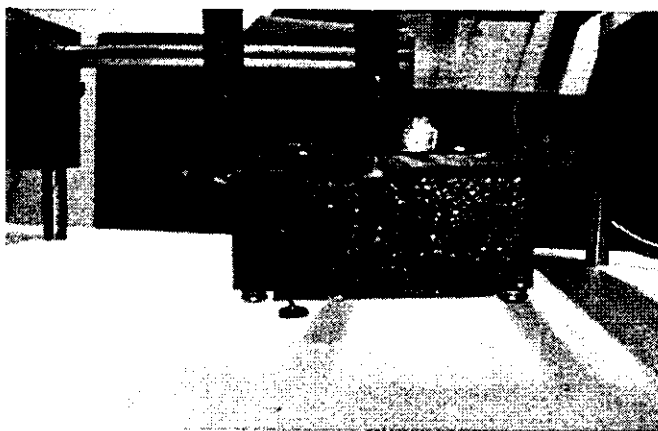


Figura 2.4: Sonda de Kelvin utilizada para detecção dos potenciais eletrostáticos.

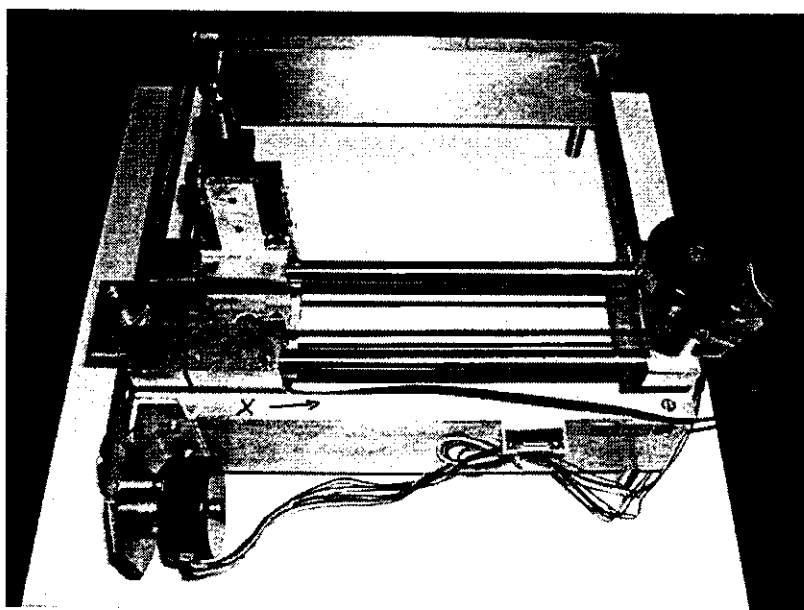


Figura 2.5: Motores utilizados para movimentação da sonda.



Figura 2.6: Voltímetro ligado ao computador.



Figura 2.7: Foto mostrando o interior da câmara de medidas com o sistema de medidas montado pronto para o início de um experimento.

2.3) Os experimentos

Quando se realiza um experimento com um polímero isolante, com o objetivo de obter informações sobre as propriedades eletrostáticas desse material, é importante e necessário saber se a amostra, antes do início do ensaio, já estava eletrizada, para evitar que se cometam erros na interpretação dos resultados. Dessa forma, antes de iniciar um experimento, faz-se um mapeamento inicial da amostra. Se algum potencial significativo for detectado, deixa-se a amostra em repouso no sistema de medida e continua-se o monitoramento até que os potenciais detectados cheguem a zero ou muito próximos de zero (± 5 V). Quando isso ocorre, a amostra está pronta para ser utilizada.

Os experimentos são constituídos de duas partes, a eletrização das amostras e o registro dos potenciais eletrostáticos, gerados pela eletrização, em função do tempo.

2.3.1) Eletrização das amostras

O método de eletrização mais usado foi através de descargas geradas pelo dispositivo antiestático Zerostat (Aldrich), mostrado na figura 2.8. Este dispositivo contém dois cristais piezoelétricos capazes de ionizar moléculas presentes no ar e criar um fluxo dos íons⁽¹⁴⁾. Quando o gatilho é pressionado, cria-se um potencial positivo na ponta do dispositivo, elétrons são arrancados das moléculas do ar e íons positivos são gerados. Quando o gatilho é solto, gera-se um potencial negativo na ponta do dispositivo, elétrons são adicionados às moléculas do ar criando íons negativos. Para eletrizar as

amostras, aponta-se o dispositivo antiestático para a área que será mapeada e aplicam-se descargas com o tipo de carga desejado.

Também se eletrizou as amostras atritando, manualmente, sua superfície com papel.



Figura 2.8: Dispositivo antiestático Zerostat utilizado na eletrização das amostras.

2.3.2) Registro dos potenciais eletrostáticos

Para a medida dos potenciais eletrostáticos define-se uma área que será varrida pela sonda. A sonda é posicionada entre 1 e 3 cm de distância da amostra, como especificado pelo fabricante, e percorre essa área parando em alguns pontos, fixados pelo programa de varredura, e medindo seu potencial. Dessa forma, também é necessário que seja definida a distância entre os pontos cujo potencial será medido e o tempo que o eletrodo permanecerá sobre cada ponto antes do potencial ser registrado. Esse último parâmetro é muito importante e será discutido na seção 2.3.2.1.

Além disso, define-se o intervalo de tempo entre varreduras sucessivas da área determinada, sendo que o intervalo normalmente utilizado foi uma

hora. Dessa forma, cada ponto tem seu potencial medido em intervalos de uma hora, até que os potenciais sobre a amostra aproximem-se de zero.

O sentido de varredura, que é fixo, neste programa, é mostrado na figura 2.9.

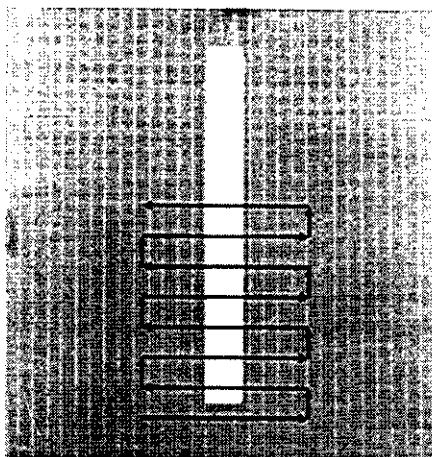


Figura 2.9: Foto mostrando o sentido de varredura dos potenciais.

Todos esses parâmetros são definidos no programa “Mesaxy” e são constantes durante todo o experimento. Além disso, o programa também registra a posição e o potencial em função do tempo em cada ponto.

2.3.2.1) Erro nas medidas

Na análise dos experimentos, observou-se que poderia ocorrer um erro na medida dos potenciais quando a sonda passava de uma região ou ponto, da área que estava sendo mapeada, para uma outra com potencial muito diferente. O tempo de resposta da sonda é de alguns segundos, portanto, o tempo que a sonda permanecia sobre essa segunda região poderia não ser suficiente para que o potencial fosse lido corretamente.

A detecção desse problema é feita através da observação dos mapas de distribuição de potenciais. A figura 2.10 mostra mapas nos quais esse erro pode ser observado.

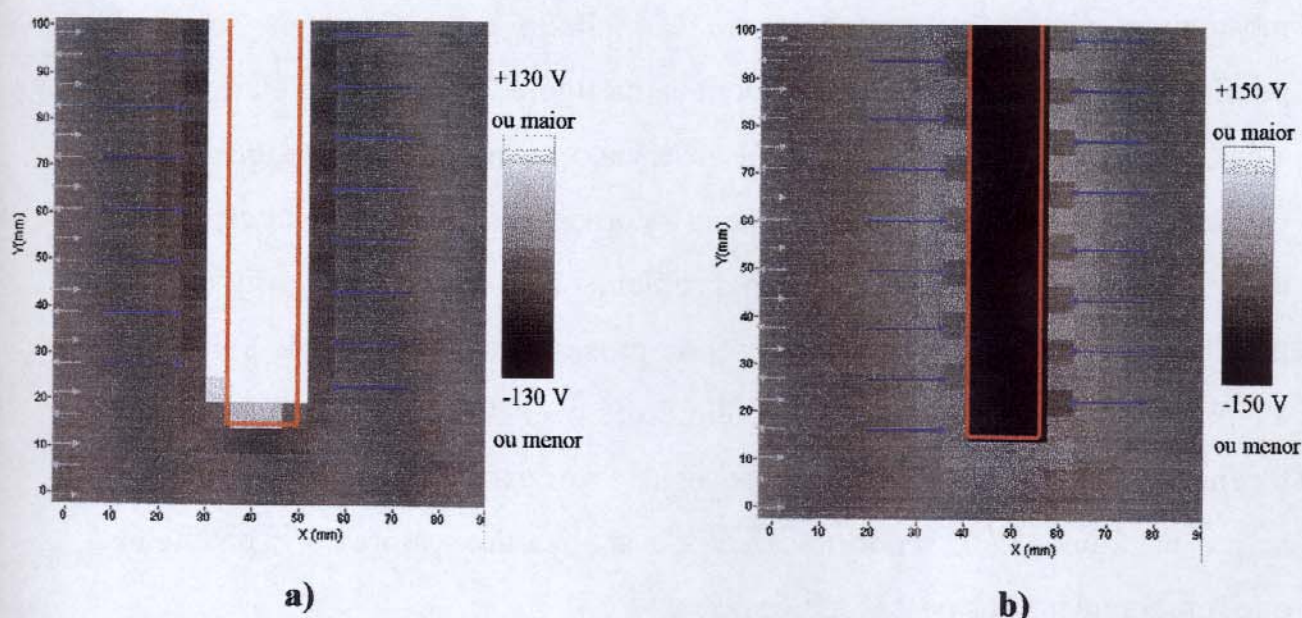


Figura 2.10: Mapas de distribuição de potenciais mostrando os pontos com erro na medida dos potenciais. **a)** amostra eletrizada com cargas positivas, **b)** amostra eletrizada com cargas negativas. A posição da amostra está marcada em vermelho.

Nos mapas mostrados na figura 2.10 observa-se facilmente que existem pontos mais claros e mais escuros que se alternam nas laterais da amostra. Isso ocorre porque, quando a sonda passa de um ponto com um determinado potencial para um outro com um valor de potencial muito diferente, por exemplo, de 150 para -20 V, ela não fica tempo suficiente sobre o segundo

ponto para que o voltímetro determine o real potencial nessa região, sendo registrado um valor incorreto.

Os mapas de distribuição de potenciais nas figuras 2.10a e 2.10b mostram uma amostra de polietileno eletrizada com cargas positivas e com cargas negativas, respectivamente, geradas pelo dispositivo antiestático. As setas azuis nos mapas mostram as regiões sobre a placa de alumínio nas quais esse erro é mais facilmente observado e as setas à esquerda nos mapas mostram o sentido de varredura em cada linha percorrida pela sonda. É possível observar que a cor desses pontos, na figura 2.10a, é mais clara do que a cor dos pontos onde o erro não foi observado, enquanto que na figura 2.10b ocorre o oposto, os pontos nos quais ocorreu o problema aparecem mais escuros do que os pontos onde o problema não aconteceu. Esse tipo de problema também ocorre quando a sonda passa de um ponto sobre a placa de alumínio para um ponto sobre o polímero, no entanto, devido à escala e à magnitude dos potenciais, não se consegue fazer essa observação a partir dos mapas na figura 2.10, sendo necessária a análise dos valores dos potenciais que foram registrados nessas regiões.

Para evitar esse problema nas medidas, basta que o tempo que a sonda permanece sobre cada região, antes do potencial ser registrado, seja aumentado. Nos experimentos realizados, o tempo de 10 segundos foi suficiente para que os potenciais fossem registrados corretamente.

Além disso, é importante salientar que o tempo que o eletrodo permanece sobre cada região é muito pequeno em relação ao tempo de decaimento dos potenciais, sendo pouco provável sua interferência no processo de dissipação.

2.3.3) Imersão em líquidos

Foram feitos testes de dissipação rápida de cargas com a imersão das peças em líquidos. Nestes testes, a amostra foi eletrizada e imersa em uma proveta com o líquido utilizando-se uma pinça de aço inoxidável. Em seguida, com a pinça, foi retirada da proveta e colocada sobre uma placa de alumínio, para secagem sob atmosfera ambiente. Os líquidos utilizados foram: água deionizada, etanol Ecibra 99,5° ACS e clorofórmio da Planta Piloto do Instituto de Química da Unicamp.

2.4) Preparação da solução aquosa de sacarose e glicerol

Para se obter uma atmosfera com 53,0 % de umidade relativa, a 25 °C, pode-se utilizar uma solução com 42,5 % de glicerol, 38,7 % de sacarose e 18,8 % de água⁽¹⁵⁾.

Para preparar a solução, foram pesados 799,7 gramas de glicerol Nuclear PA-ACS; 728,5 gramas de açúcar União e 354,20 gramas de água destilada. Os reagentes foram colocados em um béquer de vidro e agitados com um agitador mecânico e uma haste de vidro. Após horas de agitação, obteve-se uma mistura com duas fases, uma delas era uma solução de sacarose e glicerol em água e a outra açúcar não dissolvido. O sólido foi disperso na solução e a mistura foi colocada em béqueres de vidro que foram colocados dentro da câmara de medidas.

A utilização dessa mistura produziu um ambiente com umidade relativa igual a (60 ± 2) %, a (20 ± 2) °C.

3) O método de Kelvin

O método de Kelvin⁽¹⁶⁾ é uma técnica de alta sensibilidade, não destrutiva, que permite que potenciais elétricos superficiais sejam determinados rapidamente e sem a necessidade de contato com a superfície da amostra.

O método foi desenvolvido por William Thomson, Lord Kelvin⁽¹⁷⁾, em 1898 e baseia-se na formação de um capacitor de placas paralelas entre um eletrodo e a superfície que está sendo examinada ou uma placa de metal sobre a qual a amostra é colocada (figura 3.1).

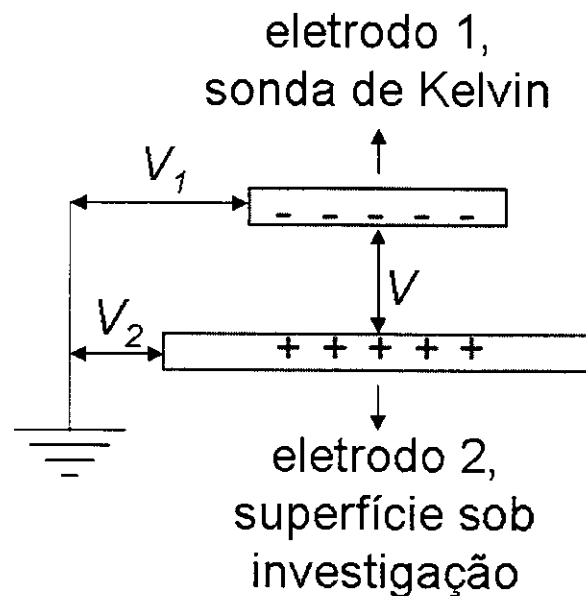


Figura 3.1: Esquema mostrando a formação de um capacitor de placas paralelas pela sonda de Kelvin, eletrodo 1, e pela superfície que está sendo investigada, eletrodo 2. V_1 é a diferença de potencial entre o eletrodo 1 e a terra, V_2 é a diferença de potencial entre o eletrodo 2 e a terra e V é a diferença de potencial entre os eletrodos do capacitor.

A capacitância de um capacitor é definida pela equação 3.1.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, C é a capacitância, Q é a carga elétrica armazenada no capacitor e V é a diferença de potencial entre as placas do capacitor, ou, como mostra a figura 3.1,

$$V = |V_1 - V_2| \quad (3.2)$$

onde V_1 é a diferença de potencial entre o eletrodo 1 e o potencial do terra e V_2 é a diferença de potencial entre o eletrodo 2 e o terra.

A capacitância de um capacitor de placas paralelas pode ser calculada pela equação 3.3.

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{D} \quad (3.3)$$

Na equação acima, ϵ é a permissividade elétrica relativa do material entre as placas do capacitor (ϵ é aproximadamente 1 para o ar); ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo e é igual a $8,85 \times 10^{-12}$ F/m; A é área das placas do capacitor e, neste caso é igual á área do eletrodo da sonda, e D é a distância entre as placas do capacitor.

Substituindo a equação 3.1 na 3.3 tem-se:

$$\begin{aligned}\frac{Q}{V} &= \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{D} \\ Q &= V \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{D}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Pela equação 3.4 pode-se notar que, com o potencial V constante, uma variação na distância D em um intervalo de tempo dt implicará em uma variação na carga Q armazenada no capacitor criando uma corrente elétrica.

Dessa forma, a equação 3.4 passa a ser escrita da seguinte maneira.

$$\begin{aligned}\frac{dQ}{dt} &= V\epsilon\epsilon_0 A \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{D(t)} \right) \\ i &= V\epsilon\epsilon_0 A \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{D(t)} \right)\end{aligned}\tag{3.5}$$

Na equação 3.5, i é a corrente que flui do capacitor ou para o capacitor e $D(t)$ é a função que define a variação da distância entre as placas do capacitor com o tempo.

Pode-se notar pela equação 3.5 que a corrente i somente será nula quando a diferença de potencial V for zero, ou seja, quando V_1 for igual a V_2 a variação da distância entre as placas do capacitor não causará uma corrente elétrica.

Assim, para a determinação de V_2 , aplica-se um potencial ao eletrodo da sonda e monitora-se a corrente elétrica. Quando esta for igual a zero, sabe-se

que V_1 é igual a V_2 , ou seja, que o potencial na amostra é igual ao potencial aplicado ao eletrodo da sonda.

Nos experimentos realizados por Kelvin as alterações no capacitor eram feitas manualmente, conseqüentemente, medidas de precisão limitada requeriam muitos minutos para serem realizadas⁽⁵⁾.

Em 1932, Zisman⁽¹⁸⁾, utilizando uma corrente elétrica ac, desenvolveu uma técnica na qual o eletrodo de Kelvin vibra na direção perpendicular à superfície do eletrodo 2. Dessa forma, a carga Q e a distância D variaram periodicamente com o tempo.

Essa técnica passou a ser conhecida como método da sonda de Kelvin vibratória e, por ser mais sensível e reduzir o tempo das medidas, tornou-se o método padrão⁽⁵⁾.

No método de Kelvin, as principais fontes de erro estão relacionadas ao ruído e à capacitância espúria, ou seja, à interação capacitiva entre as placas do capacitor e as superfícies vizinhas⁽¹⁹⁾. Vários são os trabalhos realizados na tentativa de diminuir os efeitos dessas fontes de erro sobre as medidas e de criar modelos teóricos que incluam esses efeitos nas equações⁽¹⁹⁻²⁵⁾.

As aplicações do método de Kelvin concentram-se na determinação da função de trabalho de metais e semicondutores^(19, 21, 23-28). Sendo esta propriedade característica da superfície dos materiais, qualquer efeito ou fenômeno que altere a superfície de um material alterará sua função de trabalho^(29, 30). Dentre as áreas de aplicação do método pode-se citar: contaminação de superfícies⁽³¹⁾, fotovoltagem de superfícies⁽³²⁾, corrosão⁽³³⁾ e adsorção⁽³⁴⁾.

O método também vem sendo utilizado na avaliação de potenciais na superfície de materiais isolantes, como nesse trabalho e em outros presentes na literatura⁽³⁵⁻³⁷⁾.

A sonda de Kelvin também pode ser modificada e utilizada nos mais variados ambientes como o ultra-alto vácuo⁽³⁸⁾ e em altas temperaturas⁽³⁹⁾, além de ser usada no microscópio de varredura por sonda, o que possibilita a avaliação de potenciais eletrostáticos com resolução espacial nanométrica⁽⁴⁰⁾.

4) Resultados

Os resultados descritos foram obtidos de medidas cujas condições experimentais foram estabelecidas após a utilização de informações anteriormente obtidas neste laboratório e a realização de um grande número de ensaios preliminares.

4.1) Resultados preliminares

4.1.1) Eletrização de polímeros isolantes apolares

Nos experimentos realizados neste trabalho, observou-se que qualquer tipo de contato com as amostras pode eletrizá-las. Essa eletrização tem uma grande variabilidade, tanto de valores quanto de sinal dos potenciais detectados. A figura 4.1 é um mapa de distribuição de potenciais medido sobre uma amostra de polietileno depois que esta foi tocada com uma pinça de aço inoxidável e uma pinça de teflon. O contato realizado foi um único toque, feito manualmente, entre a ponta das pinças e a superfície da amostra.

Na figura 4.1 pode-se observar, na superfície do polietileno, regiões negativas, criadas nas regiões de contato com a pinça de aço, e regiões positivas, criadas pelo contato com a pinça de teflon. Nas regiões eletrizadas, os potenciais mais negativos foram de -25,0 e -15,4 V e os potenciais mais positivos foram de 75,2 e 60,0 V.

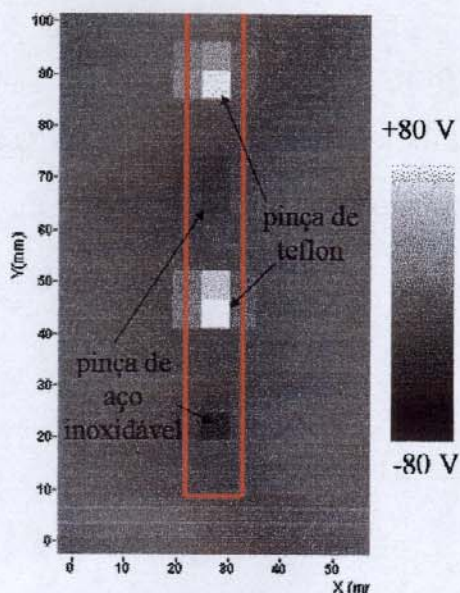


Figura 4.1: Mapa de distribuição de potenciais mostrando a eletrização de uma amostra de polietileno, marcada em vermelho, devido ao toque com uma pinça de aço inoxidável e uma pinça de teflon.

Para que cargas triboelétricas não interferissem nos experimentos, o contato com a amostra era sempre evitado e quando este era necessário, as amostras eram manuseadas em pontos distantes, pelo menos 2 cm, da região em que as medidas seriam realizadas.

Apesar das cargas geradas pelo contato durante a manipulação serem indesejáveis, é necessário conhecer suas características. Além disso, existiram situações nas quais o padrão gerado mostrou-se tão interessante que o decaimento dos potenciais foi monitorado. Uma delas foi a eletrização de uma amostra de polietileno devido ao atrito com papel durante a retirada de poeira da superfície do polímero, que será descrita na seção 4.2.3.

Outro experimento bastante interessante foi o monitoramento dos potenciais eletrostáticos durante a secagem de um filme de poliestireno. A partir de uma solução 30 % de poliestireno em tolueno, fez-se um filme sobre

uma placa de alumínio utilizando um extensor de 100 μm de espessura. Em seguida, colocou-se a placa com o filme na câmara e os potenciais foram monitorados. A figura 4.2 mostra alguns mapas de distribuição de potenciais obtidos nesse experimento.

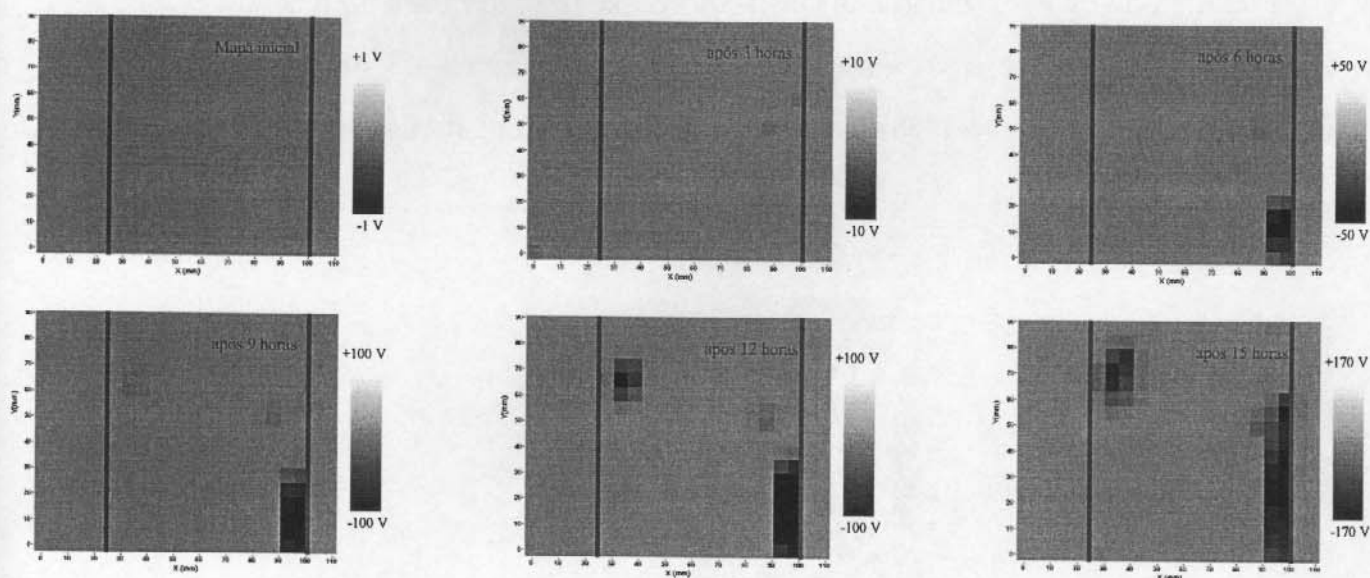


Figura 4.2: Mapas de distribuição de potenciais mostrando a eletrização de um filme de poliestireno durante sua secagem.

Os mapas na figura 4.2 mostram que, inicialmente, não foram detectados potenciais no filme de poliestireno. Após 6 horas de medidas, apareceram regiões com potenciais próximos a -50 V e, com o passar do tempo, os valores desses potenciais foram ficando mais negativos e novas regiões com potenciais negativos surgiram. Depois de 16 horas de medidas, começaram a aparecer regiões com potenciais positivos e a distribuição de potenciais ficou bastante complexa. Ao abrir a câmara, viu-se que o filme estava destruído. Acredita-se que, durante a secagem, algumas regiões do filme ficaram tensionadas e enrugaram-se, quando a sonda passou sobre essas regiões ela acabou por tocar o filme e destruí-lo. Também se acredita que as

áreas tensionadas são as mesmas áreas onde foram detectados potenciais negativos, ou seja, que os potenciais que surgiram durante a evaporação do solvente são devido às tensões criadas no filme durante sua secagem.

O método de eletrização mais utilizado nesse trabalho foi a aplicação de descargas com o dispositivo antiestático Zerostat. A figura 4.3 mostra uma amostra de polipropileno eletrizada com 4 descargas negativas geradas por esse dispositivo.

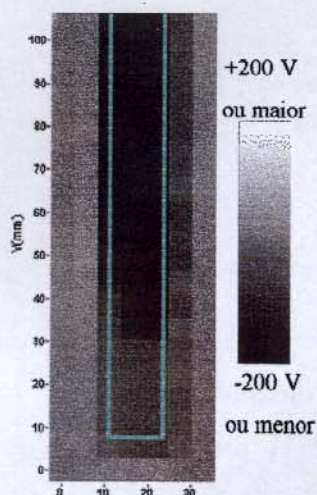


Figura 4.3: Amostra de polipropileno, marcada em verde, eletrizada com cargas negativas geradas pelo dispositivo antiestático Zerostat.

4.1.2) Indução de cargas na placa de alumínio^(4, 41)

Durante a medida dos potenciais nas amostras de polímero observou-se que as regiões da placa de alumínio ao redor da amostra apresentavam potenciais de sinal oposto aos registrados no polímero. Esses potenciais no alumínio foram atribuídos a cargas induzidas no metal pelas cargas presentes no isolante.

A indução de cargas em materiais condutores é um fenômeno bastante conhecido e importantes experimentos foram descritos por Maxwell⁽⁴²⁾.

Sabe-se que quando um corpo eletrizado aproxima-se de um material condutor, ocorre uma separação de cargas no condutor. Supondo que o corpo seja um isolante eletrizado com cargas negativas e que o material condutor esteja isolado, os elétrons livres do condutor serão repelidos e concentrar-se-ão nas regiões mais afastadas do corpo eletrizado, criando, assim, áreas com carga positiva nas partes do condutor mais próximas do isolante. Esse fenômeno é conhecido como polarização e é mostrado na figura 4.4.

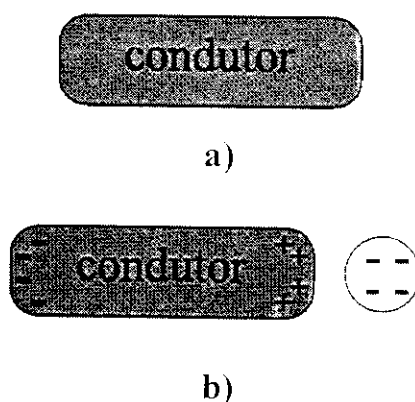


Figura 4.4: a) Material condutor isolado. b) Polarização do material condutor após a aproximação de um corpo isolante eletrizado com cargas negativas.

Quando o isolante é afastado, as cargas no condutor recombina-se e este volta para sua situação inicial.

Se o condutor estiver aterrado quando o isolante aproximar-se, os elétrons repelidos irão fluir para a terra, deixando um excesso de cargas positivas no condutor. Afastando o isolante, elétrons fluirão da terra para o condutor e neutralizarão as cargas positivas. Agora, se antes do corpo eletrizado ser afastado, o aterramento for desconectado do condutor, este

permanecerá com um excesso de cargas positivas que irão espalhar-se pela sua superfície.

Dessa forma, para mostrar que os potenciais observados na placa de alumínio são devido a cargas induzidas, o seguinte experimento foi realizado.

Uma amostra de polietileno foi posicionada no centro de uma placa de alumínio aterrada, que estava sobre placas de vidro, e descargas negativas foram aplicadas com o dispositivo antiestático ao longo da superfície do polímero e, em seguida, os potenciais foram mapeados. A figura 4.5a mostra o mapa de distribuição de potenciais obtido. Nesse mapa pode-se observar que toda a amostra apresenta potenciais negativos e que aparecem potenciais positivos nas regiões da placa de alumínio próximas à amostra.

Após essas primeiras medidas, alterou-se a posição da amostra sobre a placa de metal e um novo mapa foi registrado. A figura 4.5b exibe esse segundo mapa. Nele é possível observar a nova posição da amostra sobre a placa de alumínio e que os potenciais positivos no metal acompanharam o deslocamento do polímero.

Em seguida, retirou-se a amostra da placa de alumínio e foi feito um terceiro mapeamento. Nesse mapa, mostrado na figura 4.5c, não foi detectado nenhum potencial sobre o alumínio.

Por último, recolocou-se a amostra sobre a placa de metal, desconectou-se o aterramento da placa, retirou-se a amostra e novas medidas foram feitas. A figura 4.5d mostra esse último mapa. Nela pode-se ver que a placa de alumínio ainda apresentava potenciais positivos. Também se observa um gradiente de potencial na placa de alumínio, que pode ter sido causado pelo isolamento não perfeito da placa ou pela presença de óxido de alumínio em sua superfície.

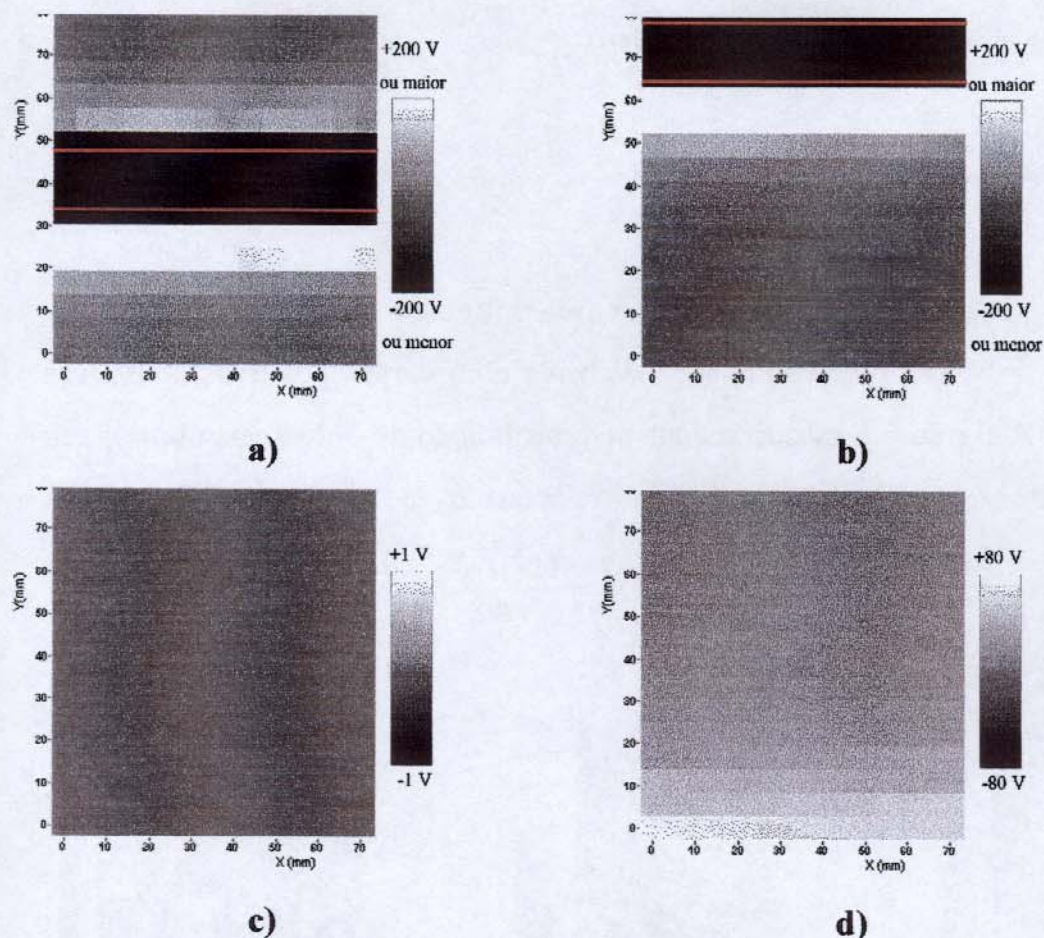


Figura 4.5: Mapas de distribuição de potenciais de um experimento onde foram aplicadas várias descargas negativas com o dispositivo antiestático em uma amostra de polietileno para mostrar a indução na placa de alumínio. **a)** amostra no centro da placa de alumínio, **b)** amostra na parte superior da placa de alumínio, **c)** placa de alumínio sem a amostra e **d)** placa de alumínio sem a amostra e desconectada do aterramento. A posição da amostra está marcada em vermelho.

Com base nesses resultados pode-se concluir que os potenciais medidos sobre a placa de alumínio são gerados por excessos de cargas que foram induzidas pelo plástico eletrizado.

4.2) Experimentos com polietileno

4.2.1) Eletrização do polietileno

Nos experimentos realizados com polietileno, observou-se que a superfície desse polímero pode ser eletrizada com cargas positivas, negativas ou ambas. A figura 4.6 mostra mapas de distribuição de potenciais obtidos em experimentos onde foram aplicadas descargas positivas, a), descargas negativas, b), e descargas positivas e negativas, c), sobre a amostra de polietileno com o dispositivo antiestático.

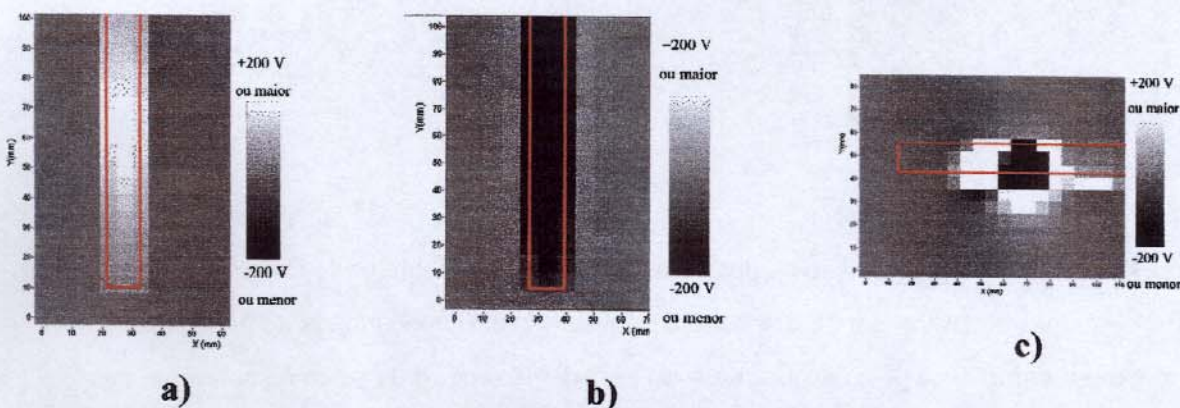


Figura 4.6: Mapas de distribuição de potenciais mostrando a eletrização de polietileno com cargas positivas em a), negativas em b), e com ambas em c). A amostra de polietileno está marcada em vermelho.

A figura 4.6a mostra um mapa de distribuição de potenciais obtido de um experimento onde foram aplicadas 2 descargas positivas a cerca de 10 cm de altura sobre o centro da amostra. Na figura 4.6b tem-se um mapa de distribuição de potenciais referente a um experimento onde 2 descargas negativas foram aplicadas a cerca de 10 cm de altura sobre o centro da

amostra. A figura 4.6c exibe um mapa de distribuição de potenciais de um ensaio onde foram aplicados 2 ciclos de descargas, ou seja, o gatilho foi pressionado e solto 2 vezes gerando cargas positivas e negativas, a menos de 1 cm de distância da superfície de uma amostra.

Na figura 4.6 observa-se a superfície do polietileno com excesso de cargas positivas, com excesso de cargas negativas e com excesso de ambas as cargas, em uma mesma amostra, com uma distribuição bastante complexa.

Também é possível eletrizar a superfície do polietileno de maneira controlada com o dispositivo antiestático. Para isso, utilizou-se um anteparo vazado, apoiado sobre blocos de alumínio de modo que ele ficasse entre a amostra e o dispositivo antiestático no momento de aplicação das descargas, sendo que a distância entre a superfície da amostra e o anteparo era de aproximadamente 1 cm. A figura 4.7 mostra um mapa de distribuição de potenciais obtido após a aplicação de 1 descarga negativa com o dispositivo antiestático em uma amostra de polietileno coberta com um anteparo de papel-alumínio, sem que houvesse contato entre o anteparo e a amostra. O anteparo possuía dois furos em forma de quadrado com aproximadamente 0,5 cm de lado que distavam 2 cm um do outro. A descarga foi aplicada entre os furos a 5 cm de altura.

Observa-se, pela figura 4.7, que apenas as regiões da amostra sob os furos do anteparo foram eletrizadas, enquanto que as outras partes da amostra, sob o anteparo, não apresentaram potenciais.

O mesmo efeito pode ser obtido utilizando-se anteparos de polietileno. Na figura 4.8 tem-se um mapa de distribuição de potenciais obtido em um experimento onde uma amostra de polietileno foi coberta com um anteparo, feito a partir de um filme de polietileno de baixa densidade, com dois furos em forma de retângulo com lados medindo, aproximadamente, 0,7 cm e 0,5 cm e

distantes 2 cm um do outro. Não houve contato entre a amostra e o anteparo e 1 descarga positiva foi aplicada com o dispositivo antiestático a 5 cm de altura sobre um dos furos.

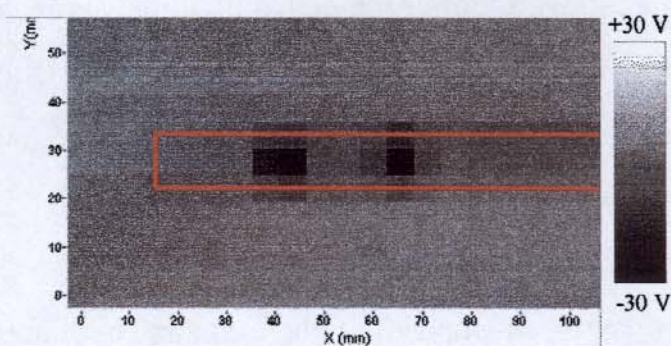


Figura 4.7: Mapa de distribuição de potenciais obtido em um experimento onde foi aplicada 1 descarga negativa com o dispositivo antiestático sobre uma amostra de polietileno que estava coberta com um anteparo vazado de papel-alumínio. A posição da amostra está marcada em vermelho.

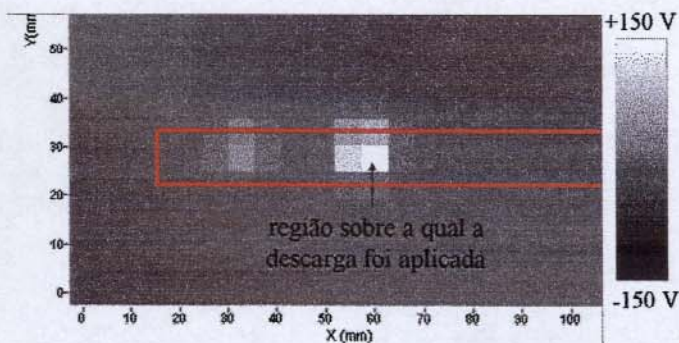


Figura 4.8: Mapa de distribuição de potenciais obtido em um experimento onde foi aplicada 1 descarga positiva com o dispositivo antiestático sobre uma amostra de polietileno que estava coberta com um anteparo vazado de polietileno. A posição da amostra está marcada em vermelho.

Com a utilização desses anteparos vazados, pode-se, também, criar regiões com excesso de cargas positivas e regiões com excesso de cargas negativas em uma mesma amostra e de maneira controlada.

Para isso utilizou-se um anteparo de papel-alumínio com dois furos em forma de quadrado de aproximadamente 3 mm de lado e distantes 3 cm um do outro para cobrir uma amostra de polietileno sem tocá-la. Enquanto um dos furos do anteparo estava coberto com outro pedaço de papel-alumínio, foram aplicadas, sobre o outro furo, 3 descargas positivas com o dispositivo antiestático a 5 cm de altura. Depois, o segundo furo foi coberto com um pedaço de papel-alumínio e, com o dispositivo antiestático, 3 descargas negativas foram aplicadas, a 5 cm de altura, sobre o primeiro furo. O mapa de distribuição de potenciais obtido nesse experimento é mostrado na figura 4.9.

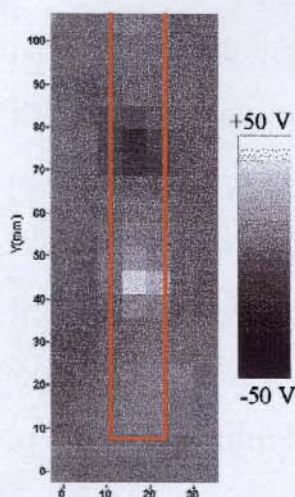


Figura 4.9: Mapa de distribuição de potenciais de um experimento no qual a amostra de polietileno foi coberta com um anteparo de papel-alumínio com dois furos. Descargas positivas foram aplicadas sobre um furo enquanto o outro estava coberto e descargas negativas foram aplicadas sobre o segundo furo enquanto o primeiro estava coberto. A posição da amostra está marcada em vermelho.

4.2.2) Monitoramento dos potenciais eletrostáticos

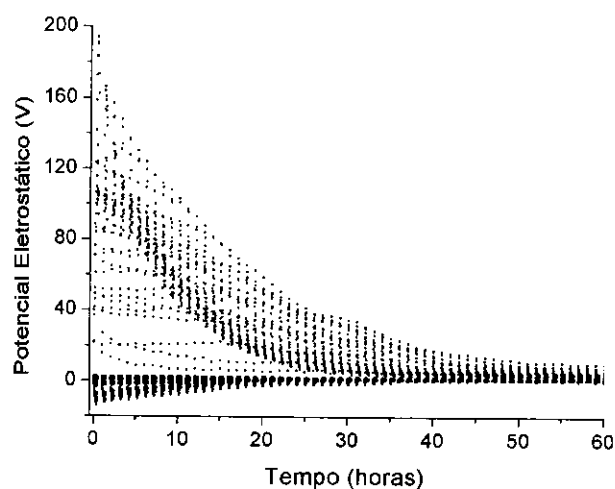
Os experimentos descritos nesta seção foram realizados com aplicação de descargas positivas ou negativas com o dispositivo antiestático em amostras de polietileno a uma altura definida, obtendo-se valores dentro da faixa de medida do voltímetro (-200 a +200 V), e os potenciais resultantes foram monitorados, sendo que o início das medidas ocorreu em menos de 2 minutos após a eletrização. A posição da amostra não foi alterada, assim, cada região medida é a mesma em todos os experimentos. A umidade relativa de equilíbrio durante essas medidas foi $(60 \pm 2) \%$.

4.2.2.1) Experimentos com descargas positivas

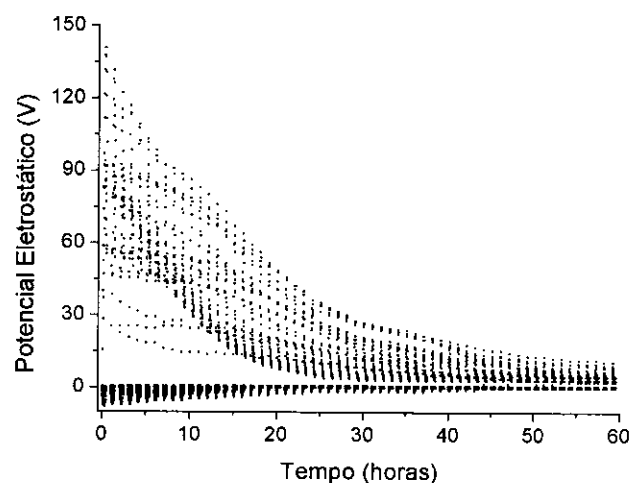
A figura 4.10 mostra gráficos de potenciais em função do tempo obtidas em quatro experimentos de eletrização de uma mesma amostra de polietileno, amostra I, com descargas positivas aplicadas com o dispositivo antiestático a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.

Essas curvas contêm todos os pontos medidos durante cada experimento. Em cada um desses quatro ensaios foram obtidos 176 pontos por varredura e cada varredura era iniciada 1 hora depois da anterior. Em 131 pontos o eletrodo estava sobre o alumínio, em 14 pontos o eletrodo estava sobre a amostra e em 31 pontos o eletrodo estava parcialmente sobre a amostra e parcialmente sobre o alumínio.

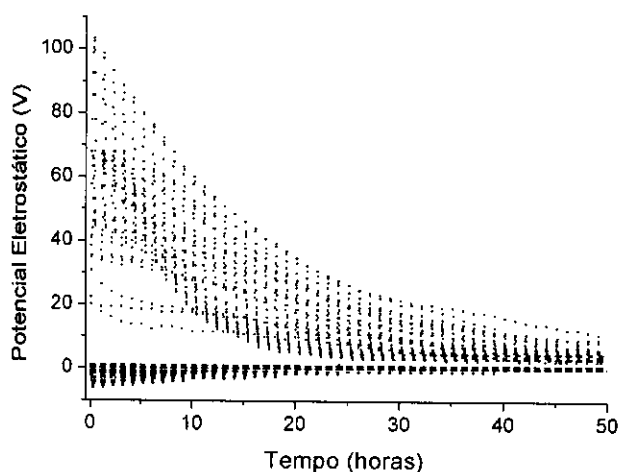
Por conter tantos pontos, a análise das curvas mostradas na figura 4.10 não é simples, no entanto, elas são muito úteis no acompanhamento dos experimentos e para se ter uma visão geral de cada experiência.



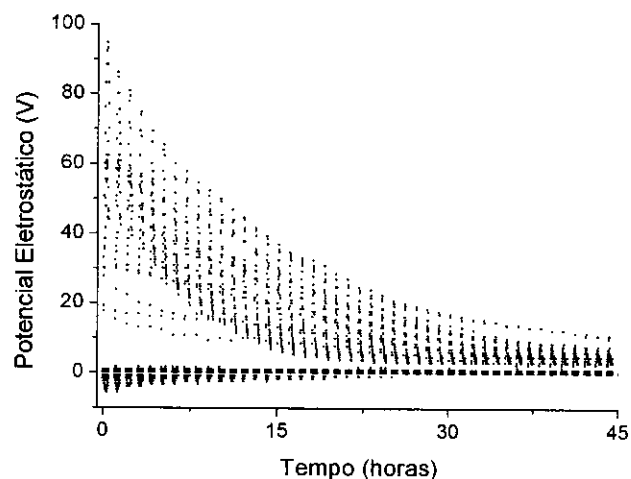
a)



b)



c)



d)

Figura 4.10: Gráficos de potencial em função do tempo de quatro experimentos onde a amostra I foi eletrizada com descargas positivas aplicadas com o dispositivo antiestático a 10 cm de altura sobre o centro da amostra. **a)** aplicação de 2 descargas **b)** aplicação de 2 descargas **c)** aplicação de 1 descarga **d)** aplicação de 2 descargas. A ordem de realização dos experimentos foi: **a, d, b e c.**

Assim, para se ter mais informações sobre o sistema, foram obtidas as curvas de variação de potencial com o tempo em cada uma das regiões

medidas pela sonda. A figura 4.11 mostra o mapa de distribuição de potenciais inicial do experimento cujo gráfico de potenciais em função do tempo é mostrado na figura 4.10a. As regiões destacadas na figura 4.11 são aquelas nas quais o eletrodo está somente sobre a amostra.

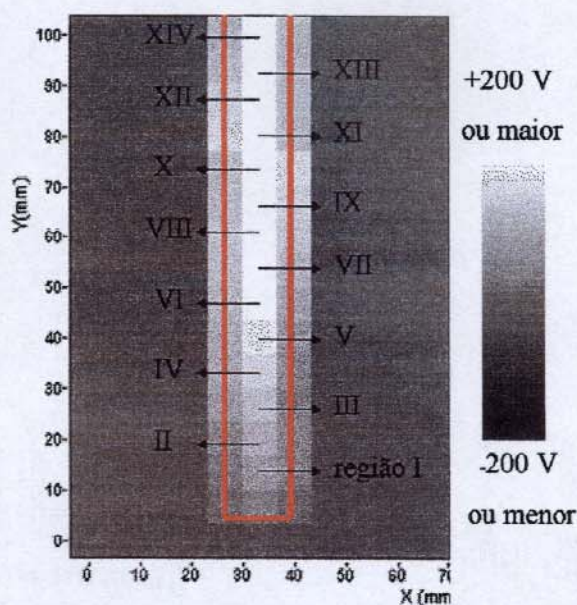


Figura 4.11: Mapa de distribuição de potenciais inicial de um experimento no qual 2 descargas positivas foram aplicadas com o dispositivo antiestático a 10 cm de altura sobre o centro da amostra (ver figura 4.10a). As regiões destacadas são aquelas onde o eletrodo está somente sobre a amostra, cuja posição está marcada em vermelho.

O mapa de distribuição de potenciais acima mostra que, das regiões destacadas, aquelas mais próximas do centro da amostra, posição onde as descargas foram aplicadas, apresentaram potencial maior que as regiões mais afastadas. A variação do potencial com o tempo de cada uma dessas regiões pode ser observada nas curvas mostradas nas figuras 4.12 a 4.25.

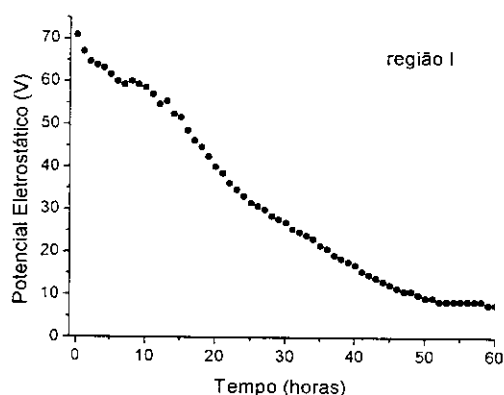


Figura 4.12: Curva de decaimento da região I mostrada na figura 4.11.

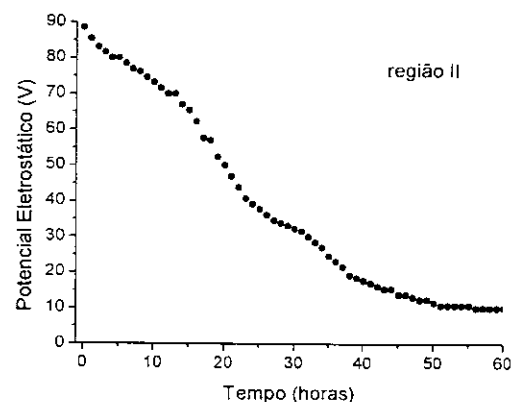


Figura 4.13: Curva de decaimento da região II mostrada na figura 4.11.

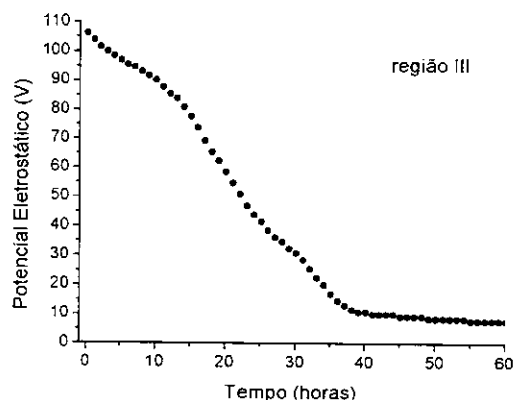


Figura 4.14: Curva de decaimento da região III mostrada na figura 4.11.

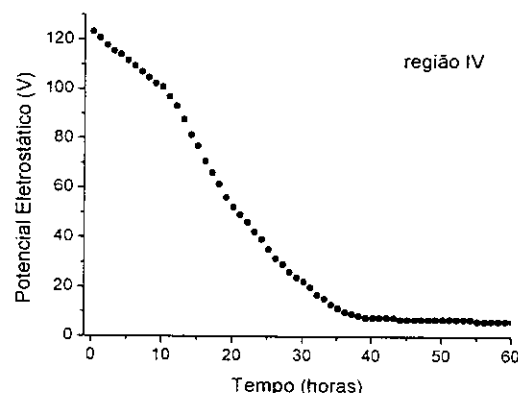


Figura 4.15: Curva de decaimento da região IV mostrada na figura 4.11.

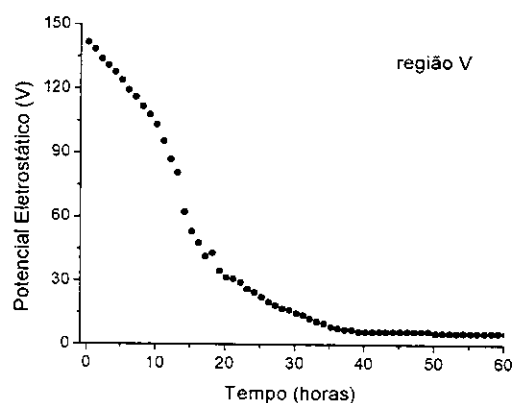


Figura 4.16: Curva de decaimento da região V mostrada na figura 4.11.

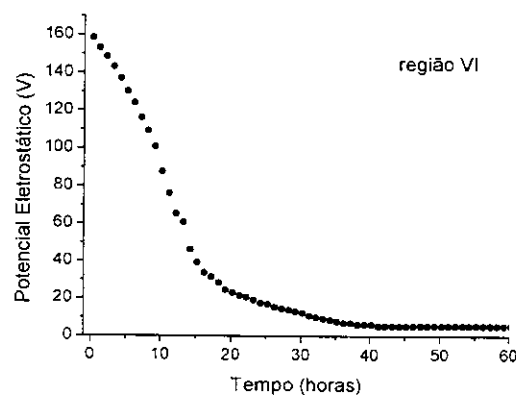


Figura 4.17: Curva de decaimento da região VI mostrada na figura 4.11.

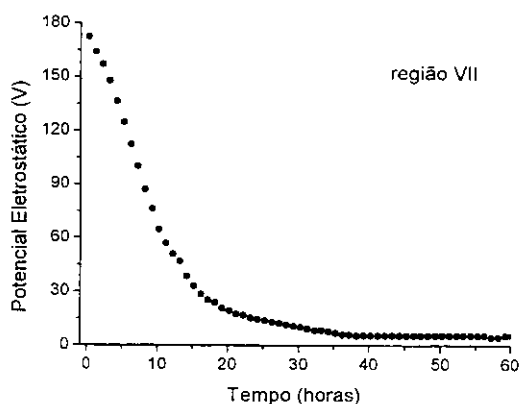


Figura 4.18: Curva de decaimento da região VII mostrada na figura 4.11.

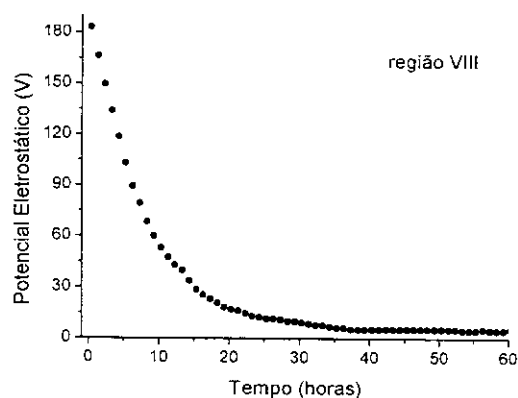


Figura 4.19: Curva de decaimento da região VIII mostrada na figura 4.11.

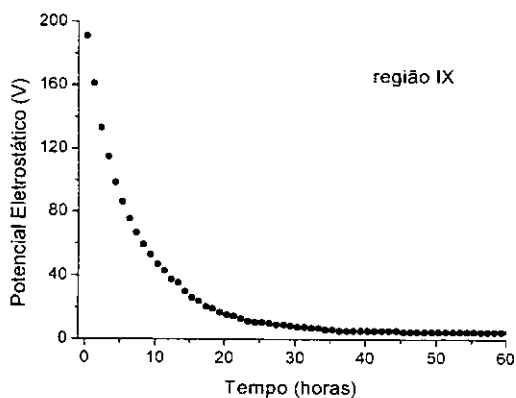


Figura 4.20: Curva de decaimento da região IX mostrada na figura 4.11.

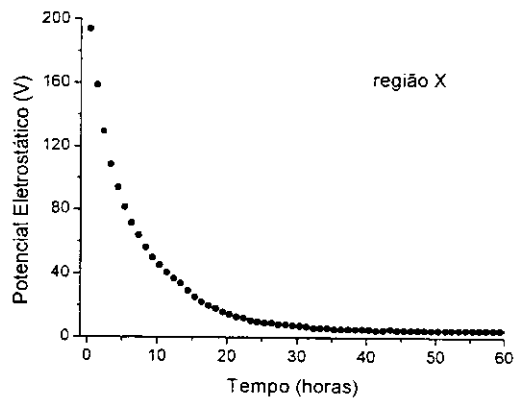


Figura 4.21: Curva de decaimento da região X mostrada na figura 4.11.

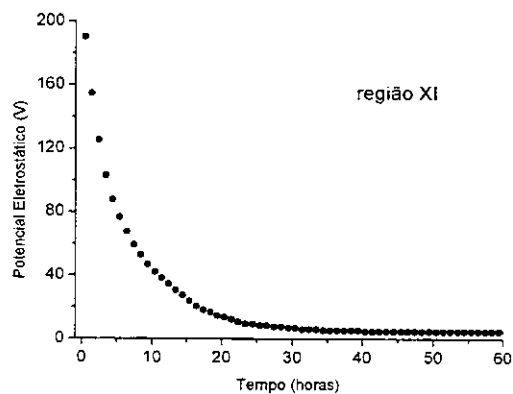


Figura 4.22: Curva de decaimento da região XI mostrada na figura 4.11.

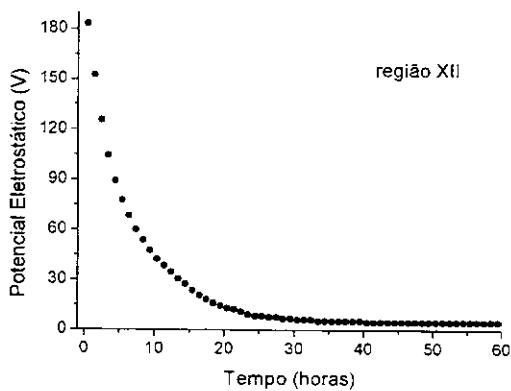


Figura 4.23: Curva de decaimento da região XII mostrada na figura 4.11.

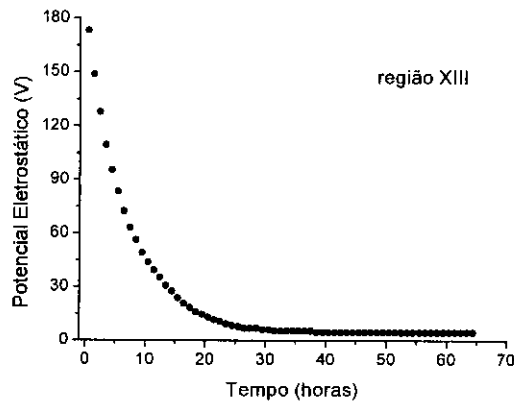


Figura 4.24: Curva de decaimento da região XIII mostrada na figura 4.11.

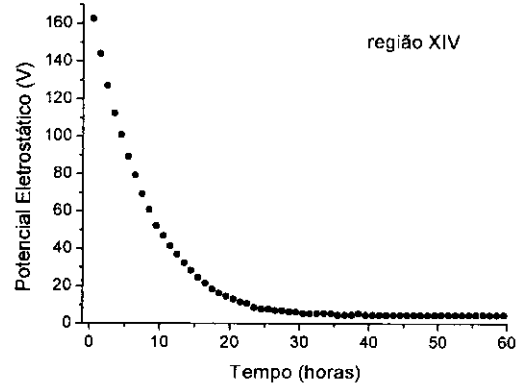


Figura 4.25: Curva de decaimento da região XIV mostrada na figura 4.11.

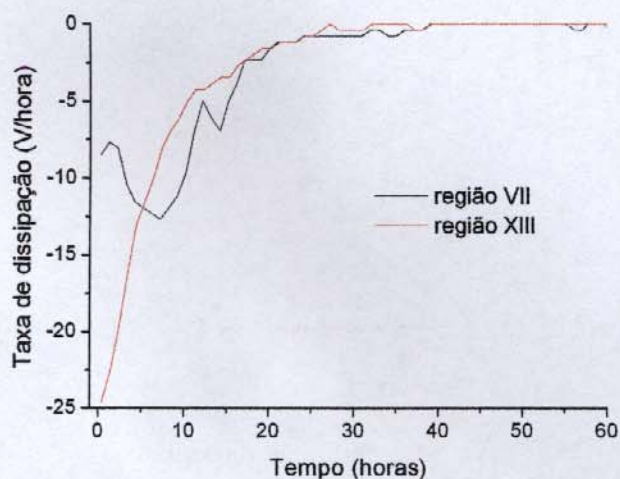
As curvas de decaimento exibidas nas figuras 4.12 a 4.25 mostram que diferentes regiões da superfície do polietileno apresentam padrão de dissipação de potenciais eletrostáticos diferentes. Também se pode observar que algumas regiões apresentam padrões de dissipação bastante semelhantes entre si.

Para uma melhor avaliação desses padrões de decaimento foi feita a derivada primeira das curvas de decaimento acima através do programa Origin 6.1; a derivada foi calculada segundo a seguinte expressão:

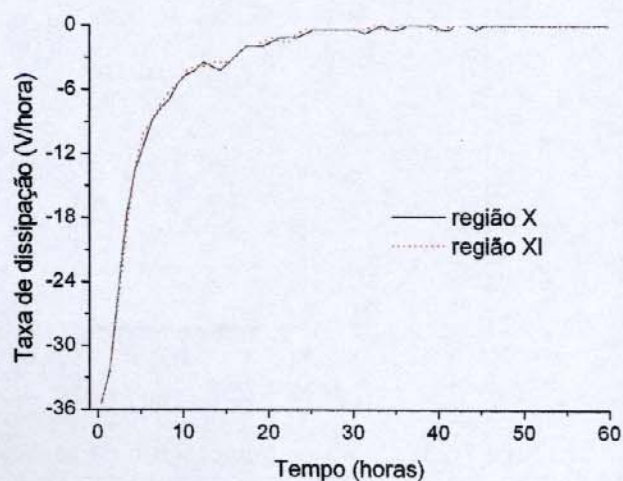
$$p'_i = \frac{1}{2} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right) \quad (4.1)$$

onde p'_i é a derivada no ponto i .

A figura 4.26 mostra a derivada do potencial eletrostático em função do tempo das regiões VII, X, XI e XIII.



a)



b)

Figura 4.26: Derivada do potencial eletrostático em função do tempo. **a)** regiões VII e XIII (ver figuras 4.11, 4.18 e 4.24), **b)** regiões X e XI (ver figuras 4.11, 4.21 e 4.22).

Pela figura 4.26a pode-se observar que as derivadas da curva de decaimento das regiões VII e XIII, com potenciais iniciais iguais a 172,5 e 173,3 V respectivamente, são bem diferentes, indicando que o decaimento nessas duas regiões ocorre de maneira diferente. A figura 4.26b mostra que nas regiões X e XI, cujos potenciais iniciais são 194,0 e 190,2 V respectivamente, as derivadas primeiras da curva de decaimento são muito parecidas, mostrando que o padrão de decaimento nessas regiões também é muito parecido.

Assim, na superfície do polietileno têm-se regiões com potenciais iniciais pouco diferentes e com padrões de decaimento bastante diferentes e regiões com potenciais iniciais próximos e com padrão de decaimento muito semelhante.

As derivadas também mostraram que a velocidade de dissipação dos potenciais diminui, em módulo, durante o experimento e tende a zero.

Também foi observado que a derivada não varia monotonicamente com o tempo, inclusive no início do decaimento.

Além disso, a análise do decaimento dessas regiões nos quatro experimentos citados na figura 4.10 mostrou que o padrão de decaimento de uma mesma região não foi o mesmo nos diferentes experimentos. A figura 4.27 mostra as derivadas das curvas de decaimento da região XIII obtidas nos quatro experimentos citados na figura 4.10.

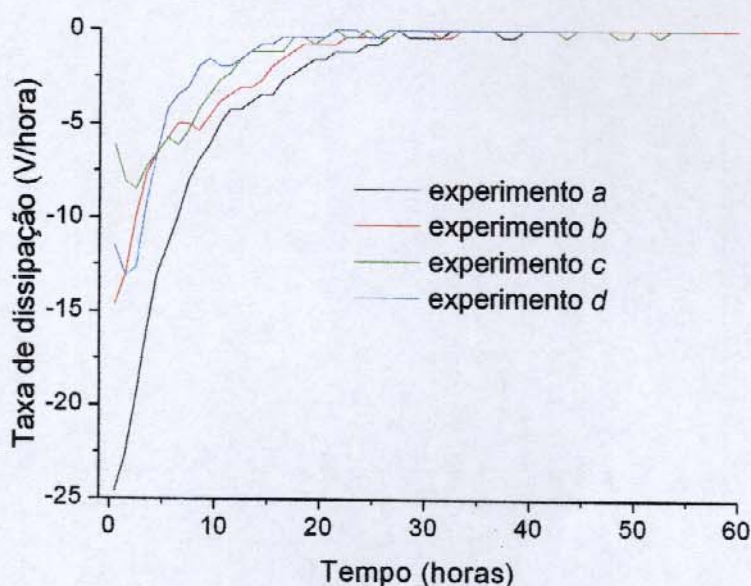


Figura 4.27: Derivadas das curvas de decaimento da região XIII obtidas nos experimentos citados na figura 4.10. Experimento *a*, figura 4.10a; experimento *b*, figura 4.10b; experimento *c*, figura 4.10c; experimento *d*, figura 4.10d.

Pela figura acima se nota que a velocidade de dissipação dos potenciais na região XIII (ver figura 4.11) diminui, em módulo, em direção a zero. Podem ser observados aumentos do módulo da velocidade em todas as curvas, sendo que nas curvas dos experimentos *c* e *d* observa-se um aumento no início do decaimento.

A eletrização de outras amostras de polietileno com o dispositivo antiestático confirma os resultados apresentados acima. A figura 4.28 mostra o gráfico de potenciais em função do tempo de um experimento com uma segunda amostra de polietileno, amostra II, no qual foi aplicada 1 descarga positiva a 10 cm de altura sobre o centro da amostra e os potenciais registrados.

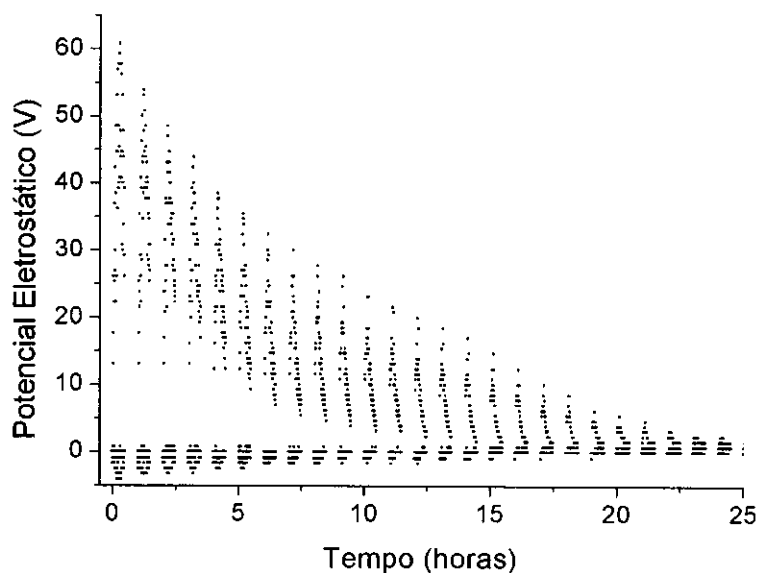


Figura 4.28: Gráfico de potenciais em função do tempo obtido em experimento onde a amostra II foi eletrizada com 1 descarga positiva gerada pelo dispositivo antiestático e aplicada a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.

Na figura 4.29 tem-se o mapa de distribuição de potenciais inicial desse experimento. As regiões destacadas nesse mapa são aquelas onde o eletrodo está somente sobre a amostra.

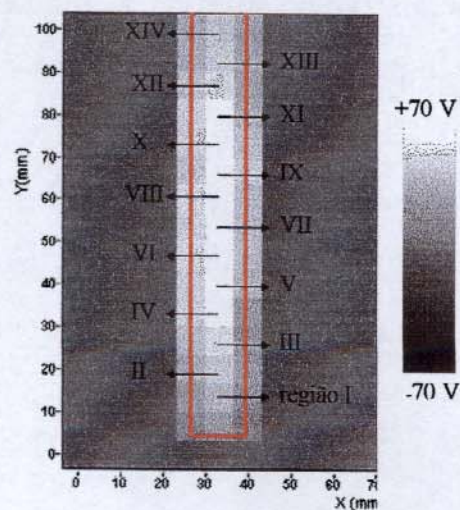


Figura 4.29: Mapa de distribuição de potenciais inicial de um experimento onde 1 descarga positiva foi aplicada com o dispositivo antiestático a 10 cm de altura sobre o centro da amostra (ver figura 4.28). As regiões destacadas são aquelas nas quais o eletrodo está somente sobre a amostra, cuja posição está marcada em vermelho.

A figura 4.30 mostra a derivada da curva de potencial versus tempo das regiões VI, VIII e IX destacadas na figura 4.29.

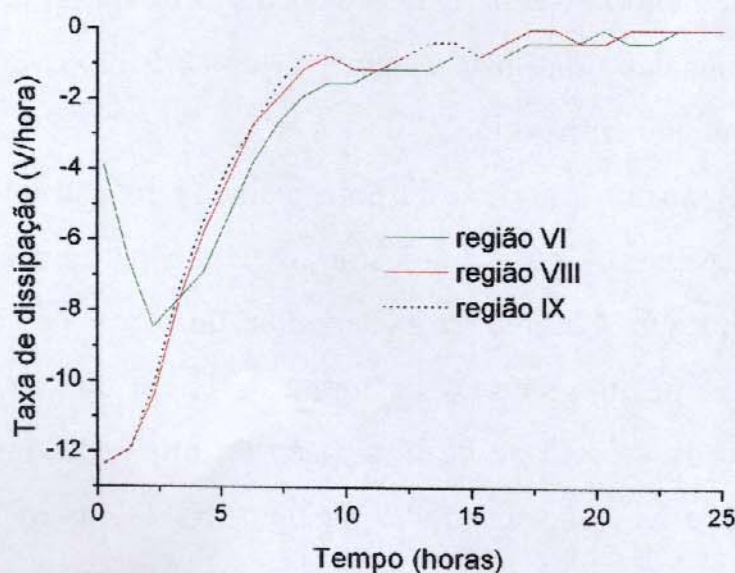


Figura 4.30: Derivada da curva de decaimento das regiões VI, VIII e IX (ver figura 4.29).

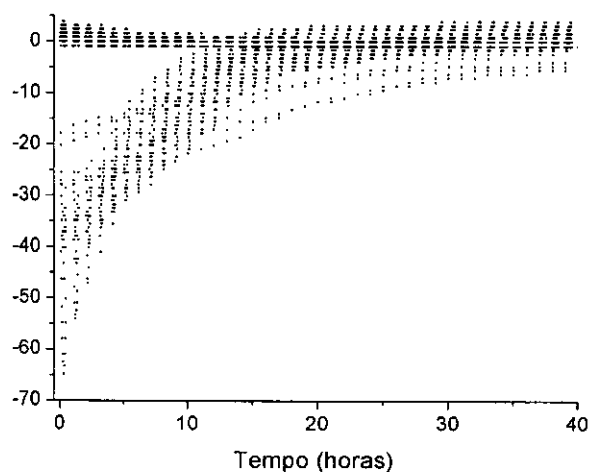
Estes novos resultados confirmam os anteriores: há regiões no polietileno com potenciais iniciais pouco diferentes, regiões VIII e IX com 60,8 e 57,8 V respectivamente, e padrão de decaimento bastante semelhante e regiões com potencial inicial de 57,8 V, regiões VI e IX, e padrão de decaimento muito diferente. Além disso, as derivadas mostram que a velocidade de dissipação diminui em módulo indo para 0, sendo que, na região VI, o decaimento inicia-se com aumento do módulo da velocidade, indo para 0 em seguida.

4.2.2.2) Experimentos com descargas negativas

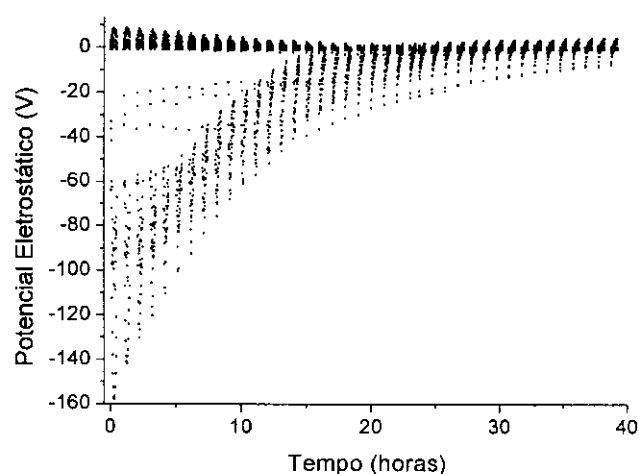
Os experimentos realizados com aplicação de descargas negativas no polietileno apresentaram resultados muito parecidos com os experimentos nos quais a amostra foi eletrizada com descargas positivas.

A maior diferença está na velocidade inicial de decaimento dos potenciais. A grande maioria das derivadas das curvas de decaimento mostra que a velocidade inicial de dissipação aumenta, em módulo, no início dos experimentos, diminuindo em seguida.

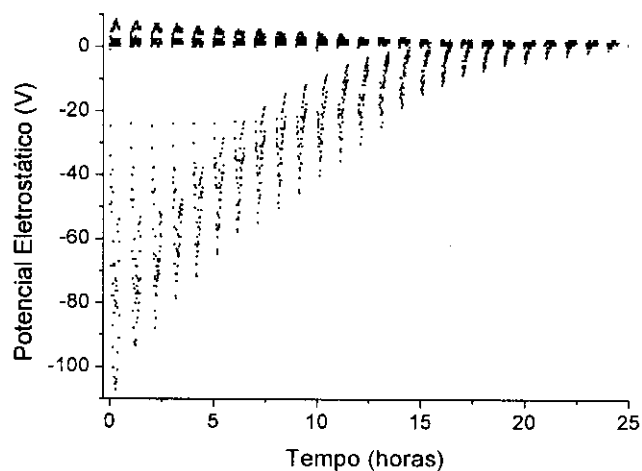
A figura 4.31 mostra o gráfico de potenciais em função do tempo de dois experimentos realizados com a amostra I e um experimento realizado com a amostra II e a figura 4.32 mostra as derivadas de curvas de decaimento, obtidas nos três experimentos citados na figura 4.31, em que se observa o aumento do módulo da velocidade de dissipação no início das medidas. As regiões VI, IX, XIII e XIV são mostradas na figura 4.11 e as regiões VII e VIII na figura 4.29.



a)



b)



c)

Figura 4.31: Gráficos de todos os pontos obtidos em dois experimentos realizados com a amostra I, **a)** e **b)**, e um experimento realizado com a amostra II, **c)**. **a)** 1 descarga negativa aplicada a 20 cm de altura sobre o centro da amostra, **b)** 1 descarga negativa aplicada a 17 cm de altura sobre o centro da amostra, **c)** 1 descarga negativa aplicada a 17 cm de altura sobre o centro da amostra.

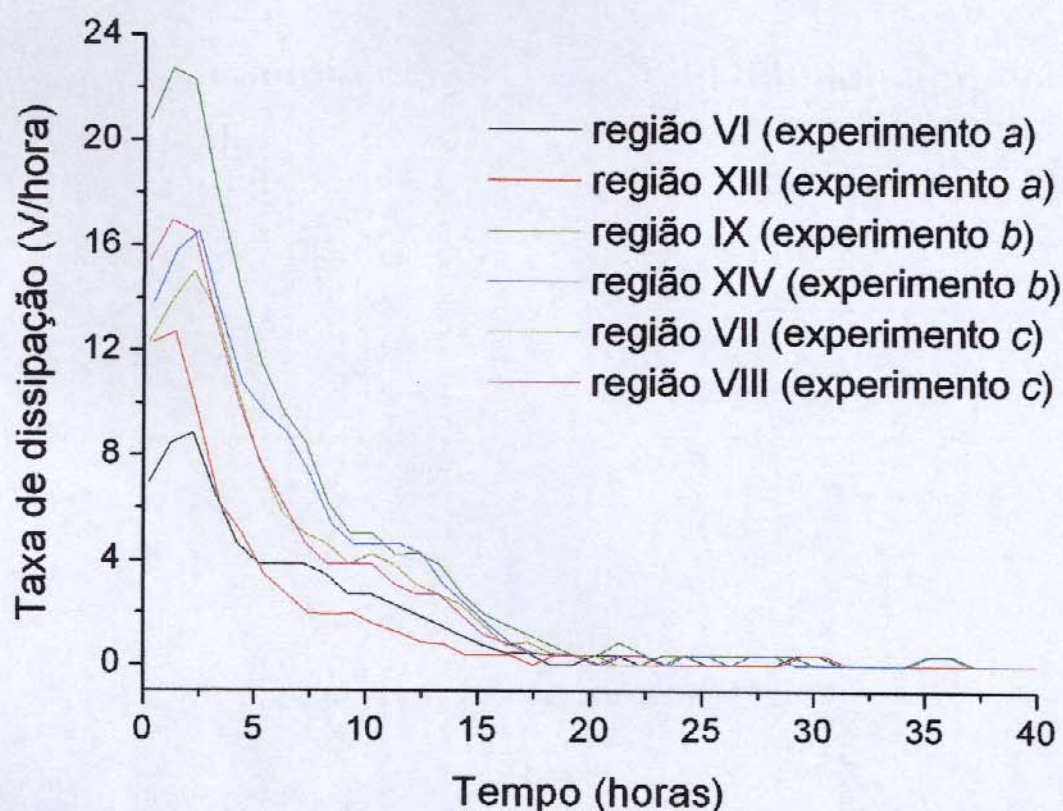


Figura 4.32: Derivadas de curvas de decaimento obtidas nos experimentos citados na figura 4.31. Experimento *a*, figura 4.31a; experimento *b*, figura 4.31b; experimento *c*, figura 4.31c.

Nos apêndices são mostrados os mapas de distribuição de potenciais inicial dos experimentos descritos e as curvas de decaimento das regiões analisadas juntamente com suas derivadas.

4.2.3) Eletrização pelo atrito com papel

A superfície de uma amostra de polietileno foi atritada com papel para a remoção de partículas de poeira ali presentes. Inicialmente, desejava-se apenas limpar as amostras com papel para sua utilização em experimentos futuros. No entanto, após esse procedimento, a amostra apresentou uma distribuição de potenciais tão interessante que foi feito o seu monitoramento. Durante o registro dos potenciais foram feitas várias mudanças na atmosfera da câmara de medidas.

A figura 4.33 mostra o primeiro mapa de distribuição de potenciais obtido.

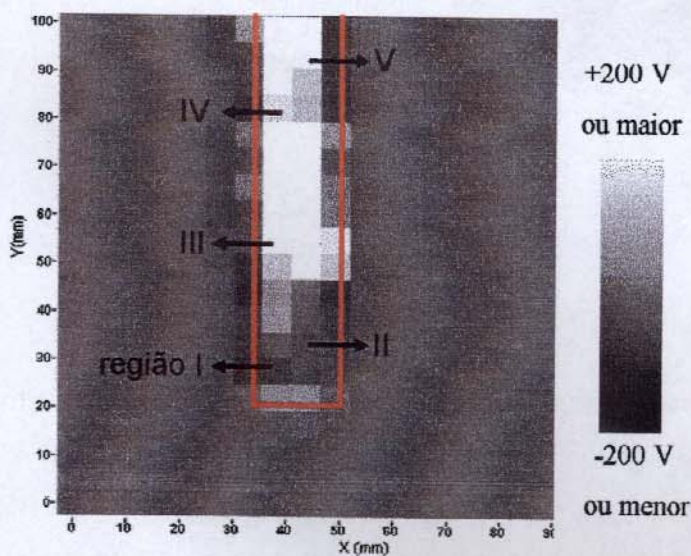


Figura 4.33: Primeiro mapa de distribuição de potenciais obtido após uma amostra de polietileno ser atritada com papel. A posição da amostra está mostrada em vermelho.

Na figura 4.33, observa-se que, após o atrito com papel, a superfície do polietileno apresentou regiões com potenciais positivos e regiões com

potenciais negativos. As regiões positivas são mais extensas e apresentaram potenciais que ultrapassaram o limite do voltímetro (200 V) enquanto que nas regiões negativas, o menor potencial registrado foi de -60,2 V.

A figura 4.34 mostra os potenciais em função do tempo registrados nesse experimento.

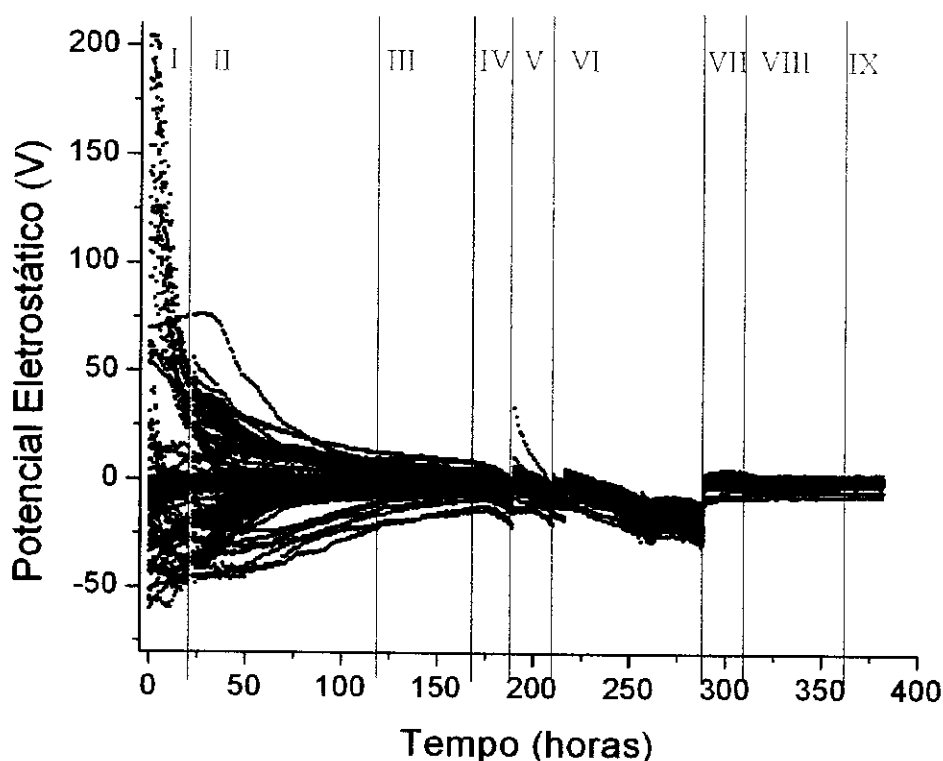


Figura 4.34: Potenciais em função do tempo gerados em polietileno pelo atrito com papel. O ambiente de medidas foi sujeito a várias alterações da umidade relativa: I) 45 a 65 %; II) 42,0 %, com fluxo de argônio; III) 62,5 %, com fluxo de argônio; IV, V e VI) acima de 90 %; VII) 39,5 %, com fluxo de argônio; VIII) 58,5 %; IX) 35,0 %, com fluxo de argônio. As linhas vermelhas marcam o momento em que se iniciou a alteração da umidade relativa no interior da câmara, em algumas etapas a câmara precisou ser aberta.

O gráfico de potenciais em função do tempo mostrado na figura 4.34 foi dividido em várias etapas conforme as alterações da umidade relativa dentro

da câmara de medidas. A etapa inicial I do gráfico refere-se a medidas realizadas em uma atmosfera cuja umidade relativa variava entre 45 e 65 %. Em seguida (etapa II) foi introduzida na câmara uma corrente de argônio seco borbulhado em uma solução aquosa de sacarose e glicerol e a umidade relativa foi para 42,0 %. Na etapa III trocou-se a solução por água destilada, mantendo-se o fluxo de argônio, e a umidade relativa aumentou para 62,5 %. Desligou-se o fluxo de argônio, abriu-se a câmara e recipientes com água destilada foram colocados em seu interior, isso fez com que a umidade relativa ficasse superior a 90 % e, por ultrapassar uma das condições de operação do aparelho, especificada pelo fabricante (umidade relativa até 90 % sem condensação), as medidas realizadas pelo voltímetro não são confiáveis; essa situação ocorreu nas etapas IV, V e VI, sendo que a câmara também foi aberta no início das etapas V e VI. Na etapa VII, abriu-se a câmara, os recipientes com água destilada foram retirados e o fluxo de argônio foi religado, a umidade relativa medida foi de 39,5 %. Na próxima etapa, desligou-se o fluxo de argônio, abriu-se a câmara e recipientes com a solução aquosa de sacarose e glicerol foram colocados em seu interior, a umidade relativa subiu para 58,5 %. Na etapa final, etapa IX, abriu-se a câmara, os recipientes com a solução foram retirados e o fluxo de argônio foi reiniciado, a umidade relativa caiu para 35,0 %.

O gráfico da figura 4.34 mostra que foram detectados potenciais eletrostáticos no polietileno por um tempo muito maior do que o tempo observado nos experimentos com descargas geradas pelo dispositivo antiestático. Enquanto nos experimentos com descargas o tempo de persistência dos potenciais é da ordem de dezenas de horas, no experimento com atrito com papel, esse tempo foi da ordem de centenas de horas.

Além disso, observou-se uma mudança brusca nos valores dos potenciais com a alteração da umidade relativa apenas quando essa foi superior a 90%, ou seja, quando a umidade relativa estava numa faixa em que o bom funcionamento do aparelho não é garantido pelo fabricante (etapas IV, V e VI) e quando a umidade relativa passou de um valor superior a 90% para um valor dentro da faixa de bom funcionamento do voltímetro, por exemplo, etapa VII.

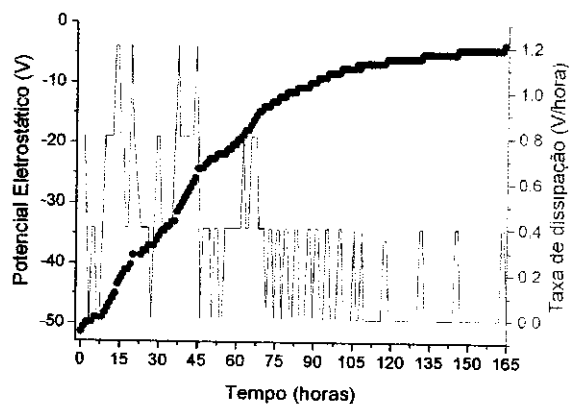
A figura 4.35 mostra a curva de decaimento, com sua derivada, das regiões I, II, III, IV e V destacadas na figura 4.33. Essas curvas mostram a variação do potencial eletrostático com o tempo até o final da etapa III.

Pelas derivadas na figura 4.35, novamente observa-se que regiões diferentes da superfície do polietileno dissipam os potenciais eletrostáticos de maneiras diferentes.

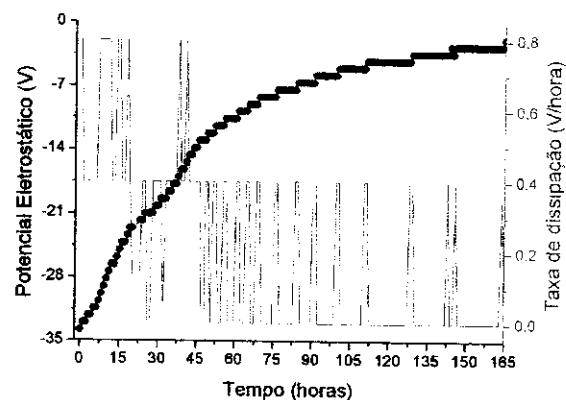
Também se observa que, nas regiões com potencial positivo, regiões III, IV e V, a velocidade de decaimento aumenta no início do decaimento e depois diminui para um valor muito próximo de zero e, nas regiões com potencial negativo, regiões I e II, a taxa de dissipação é sempre pequena e varia bastante.

4.2.4) Dissipação dos potenciais com imersão em líquidos

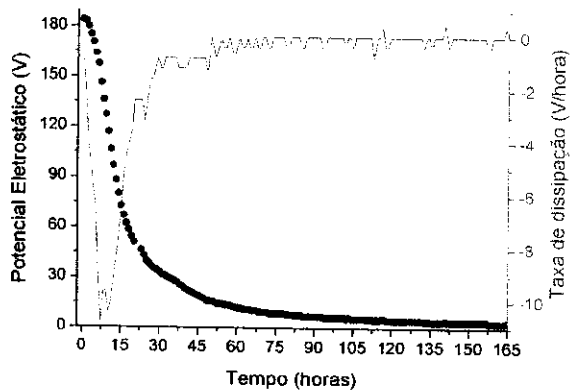
Foram utilizados alguns líquidos para dissipar rapidamente os potenciais eletrostáticos presentes em amostras de polietileno eletrizadas. A amostra, depois de eletrizada, foi colocada em um frasco com o líquido, em seguida retirada do frasco e colocada sobre uma placa de alumínio para secagem sob atmosfera ambiente.



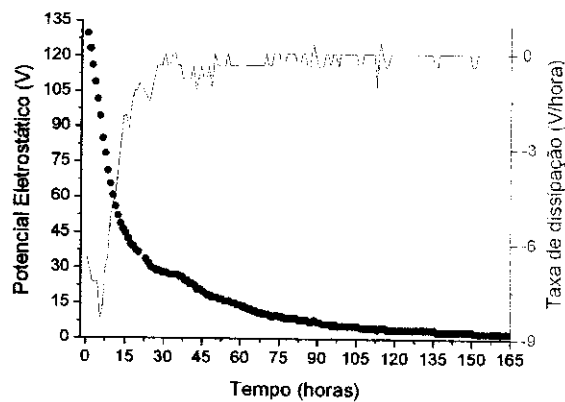
a)



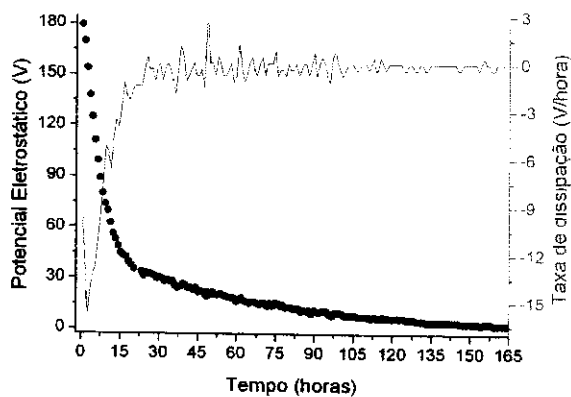
b)



c)



d)



e)

Figura 4.35: Curva de decaimento e derivada das regiões destacadas na figura 4.33. a) região I, b) região II, c) região III, d) região IV, e) região V.

Os líquidos utilizados foram: água deionizada, etanol e clorofórmio.

4.2.4.1) Imersão em água

A figura 4.36 mostra mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno que, após ser eletrizada com o dispositivo antiestático, foi imersa em água deionizada.

A figura 4.36a mostra o mapa de distribuição de potenciais obtido após a aplicação de 5 descargas positivas com o dispositivo antiestático e a figura 4.36b mostra o mapa de distribuição de potenciais dessa mesma amostra após a imersão em água deionizada seguida de secagem ao ar. Observa-se que antes da imersão em água, apenas potenciais positivos foram detectados sobre a superfície do polietileno sendo que, em muitas regiões, esses potenciais ultrapassavam 200 V. Após a imersão em água e secagem da amostra, foram detectados tanto potenciais positivos quanto negativos cujos valores estavam entre -100 e 90 V.

As figuras 4.36c e 4.36d mostram mapas de distribuição de potenciais obtidos em um ensaio no qual a amostra de polietileno foi eletrizada com 7 descargas negativas, geradas pelo dispositivo antiestático, e, depois, banhada com água deionizada e seca sob atmosfera ambiente. Nota-se que, como no ensaio anterior, antes da imersão em água apenas potenciais de um tipo foram registrados sobre a amostra e depois da imersão potenciais de ambos os sinais foram detectados. Antes do banho foram medidos potenciais menores que -200 V e após o banho existiam na amostra potenciais entre -100 e 110 V.

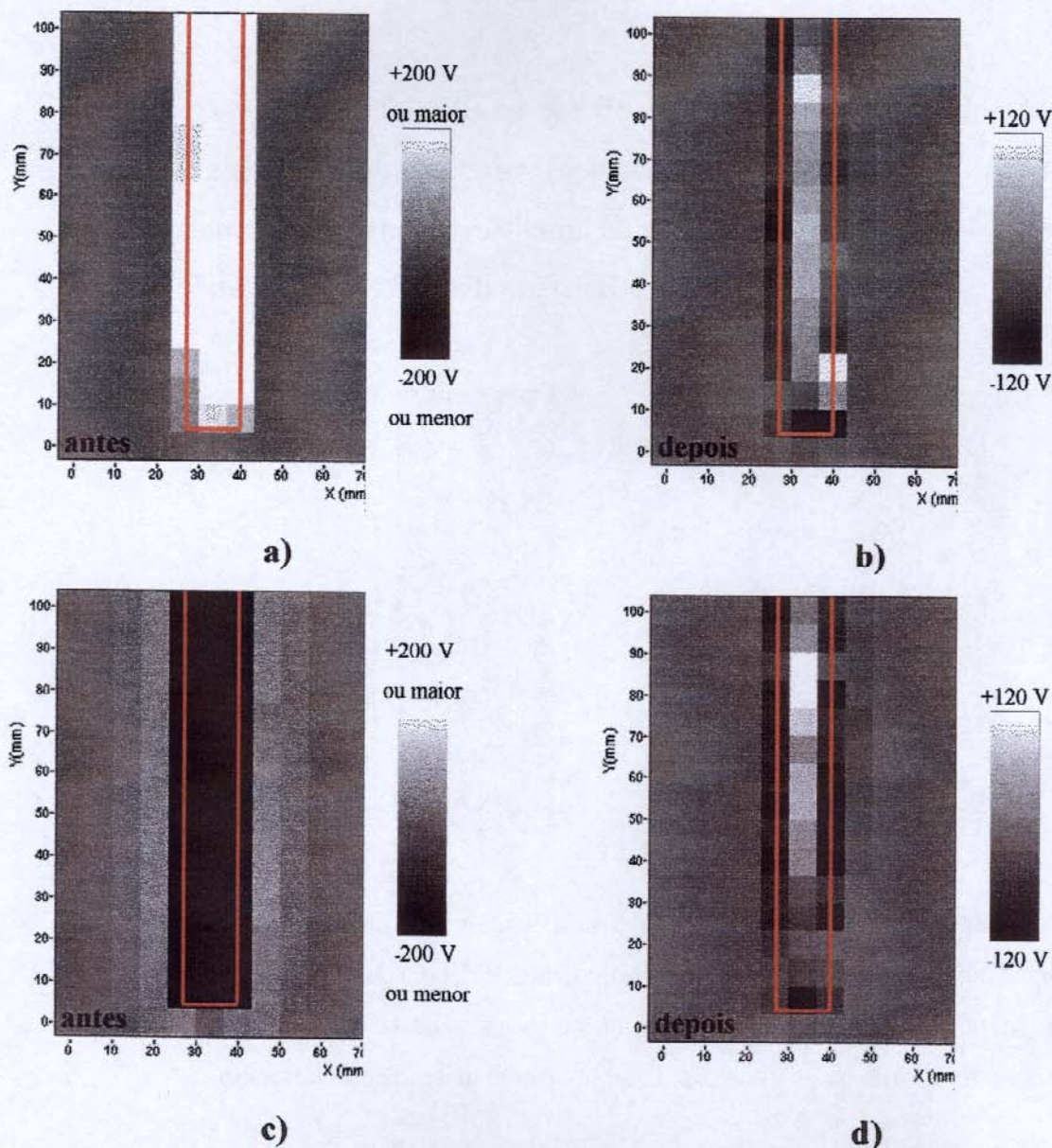


Figura 4.36: Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com o dispositivo antiestático antes e depois de ser imersa em água deionizada. **a)** amostra eletrizada com descargas positivas antes da imersão, **b)** amostra eletrizada com descargas positivas depois da imersão, **c)** amostra eletrizada com descargas negativas antes da imersão, **d)** amostra eletrizada com descargas negativas depois da imersão. Os mapas obtidos depois da imersão foram registrados após a secagem da água que ocorreu em aproximadamente 2 horas. A posição da amostra está marcada em vermelho.

4.2.4.2) Imersão em etanol

O etanol mostrou-se bastante eficaz na dissipação de cargas em polietileno. A figura 4.37 mostra mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno antes e depois da imersão em etanol. A amostra foi eletrizada com 2 descargas positivas geradas pelo dispositivo antiestático.

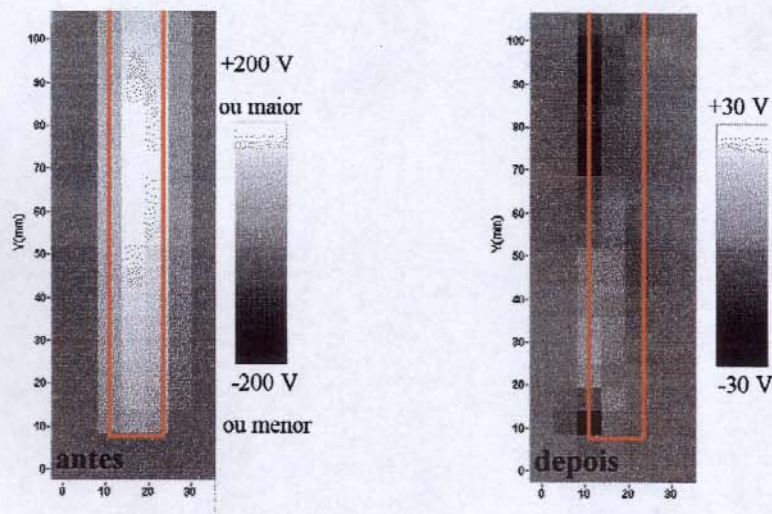


Figura 4.37: Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas positivas do dispositivo antiestático antes e depois da imersão em etanol. O mapa feito depois da imersão foi registrado após a secagem do álcool, que ocorreu em menos de 9,5 minutos. A posição da amostra está marcada em vermelho.

Pela figura 4.37 nota-se que antes da imersão em etanol, foram registrados, sobre a amostra, potenciais positivos que chegavam até 160 V. O banho de álcool resultou na dissipação de grande parte dos potenciais sendo que algumas regiões da amostra ficaram negativamente carregadas. Os potenciais registrados após a secagem do etanol estavam numa faixa de -30 a 10 V.

A figura 4.38 mostra mapas de distribuição de potenciais obtidos em um ensaio onde uma amostra de polietileno, eletrizada com 3 descargas negativas geradas pelo dispositivo antiestático, foi banhada em etanol.

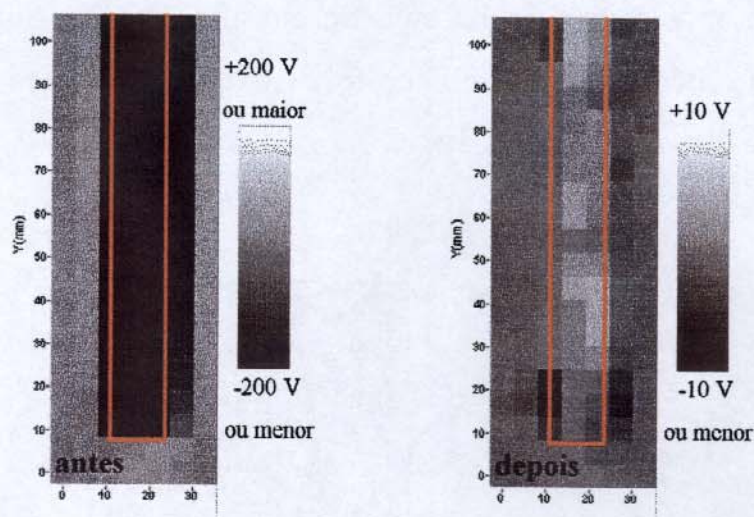


Figura 4.38: Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas negativas do dispositivo antiestático antes e depois da imersão em etanol. O mapa feito depois da imersão foi registrado após a secagem do álcool, que ocorreu em menos de 9,5 minutos. A posição da amostra está marcada em vermelho.

Na figura 4.38, nota-se que na amostra existiam potenciais negativos que ultrapassavam o limite do voltímetro. Banhando-se a amostra em etanol observou-se um resultado muito semelhante ao ensaio anterior, ocorreu a dissipação de grande parte dos potenciais que estavam presentes na superfície do polietileno e algumas regiões do polímero ficaram positivamente carregadas. As regiões eletrizadas após a secagem do álcool apresentaram potenciais entre de -10 e 10 V.

4.2.4.3) Imersão em clorofórmio

O clorofórmio também se mostrou bastante eficiente na dissipação rápida de cargas em polietileno. Na figura 4.39 tem-se o mapa de distribuição de potenciais antes e após a imersão da amostra em clorofórmio. Antes da imersão no líquido, a superfície do polietileno foi eletrizada com 5 descargas positivas geradas pelo dispositivo antiestático.

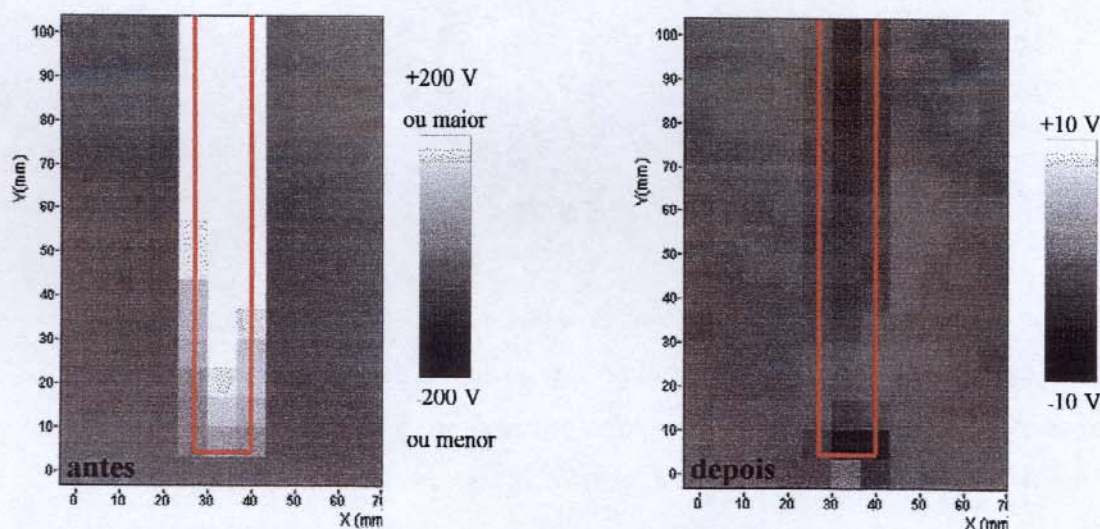


Figura 4.39: Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas positivas geradas pelo dispositivo antiestático antes e depois da imersão em clorofórmio. O mapa feito após a imersão foi registrado depois da secagem do clorofórmio, que ocorreu em menos de 20 segundos. A posição da amostra está marcada em vermelho.

Observa-se pela figura acima que a superfície do polímero apresentava apenas potenciais positivos antes do banho, sendo que em algumas regiões esses potenciais ultrapassaram o limite do voltímetro. Após o banho de

clorofórmio os potenciais foram quase que totalmente dissipados sendo que as regiões ainda eletrizadas apresentaram potenciais entre -5 e 2 V.

O clorofórmio, como o etanol, também é capaz de dissipar rapidamente cargas negativas em polietileno. A figura 4.40 mostra mapas de distribuição de potenciais de uma amostra eletrizada com 5 descargas negativas geradas pelo dispositivo antiestático antes e depois da imersão em clorofórmio.

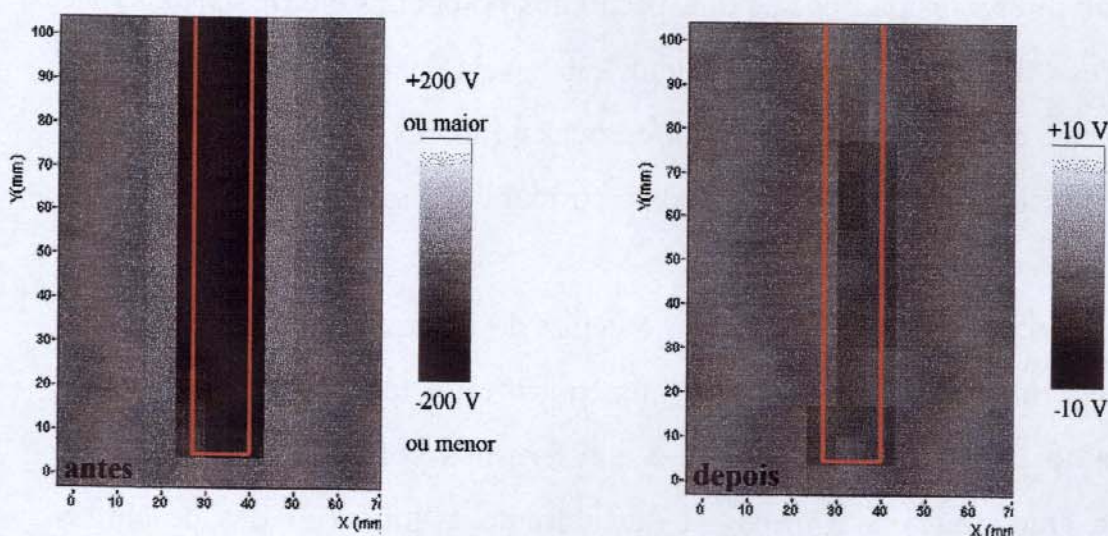


Figura 4.40: Mapas de distribuição de potenciais de uma amostra de polietileno eletrizada com descargas negativas geradas pelo dispositivo antiestático antes e depois da imersão em clorofórmio. O mapa feito após a imersão foi registrado depois da secagem do clorofórmio, que ocorreu em menos de 20 segundos. A posição da amostra está marcada em vermelho.

Observando os mapas de distribuição de potenciais mostrados na figura 4.40, nota-se que sobre a amostra, antes da imersão em clorofórmio, foram registrados apenas potenciais negativos sendo que alguns deles eram menores que -200 V. O resultado observado após o banho com o líquido foi muito parecido ao resultado do ensaio realizado com polietileno eletrizado

positivamente, quase todos os potenciais registrados antes da imersão foram dissipados e potenciais que persistiram após o banho estavam numa faixa de -4 a 1 V.

4.2.5) Discussão

Os experimentos com eletrização do polietileno e monitoramento dos potenciais mostraram que diferentes regiões da superfície desse polímero apresentam diferentes padrões de dissipação dos potenciais eletrostáticos.

Esses diferentes padrões podem estar relacionados com diferenças morfológicas, como defeitos, e com diferenças químicas, como a existência de espécies sorvidas e regiões oxidadas formando domínios discretos, na superfície do polímero.

Como o dispositivo antiestático é capaz de ionizar moléculas presentes no ar e criar um fluxo desses íons⁽¹⁴⁾, um outro fator que possivelmente tem influência no padrão de dissipação é a natureza dos portadores de carga que atingem a amostra, pois é provável que durante a aplicação das descargas diferentes moléculas sejam ionizadas. Outro fator que poderia ser importante é o potencial inicial de cada região, no entanto, não foi encontrada uma correlação entre o padrão de decaimento e o potencial inicial.

Ieda, Sawa e Shinohara^(43, 44) realizaram experimentos de decaimento em filmes de polietileno nos quais as amostras foram monitoradas por 10 minutos e eletrizadas a potenciais até 3000 V e observaram que o decaimento é mais rápido quando o potencial inicial é mais alto. Sonnonstine e Perlman⁽⁴⁵⁾, para explicar essa observação, propuseram que, a potenciais iniciais mais altos, as

cargas dirigem-se através do polímero sob a influência dos seus próprios campos, o que aumentaria a velocidade do decaimento.

Pelas derivadas das curvas de decaimento mostradas aqui, observou-se que o módulo da velocidade de dissipação pode, no início do decaimento, aumentar ou diminuir. Além disso, não foi encontrada relação entre o aumento do módulo da taxa de decaimento e o valor do potencial inicial na amostra. No entanto, as diferenças entre as condições experimentais dos ensaios realizados por Ieda, Sawa e Shinohara e dos experimentos realizados neste trabalho dificultam a comparação. Assim, é necessário mais investigações para que se compreenda esse aumento na velocidade de dissipação dos potenciais.

Nos experimentos com descargas, os íons formados, ao atingirem a superfície da amostra, interagem com ela e podem transferir sua carga para o polímero. Como foi mostrado, os potenciais gerados por essas cargas decaem com o tempo. O mecanismo de dissipação de cargas discutido na literatura consiste na migração dos portadores de carga através do polímero em direção à placa metálica. Um esquema mostrando essa hipótese é mostrado na figura 4.41.

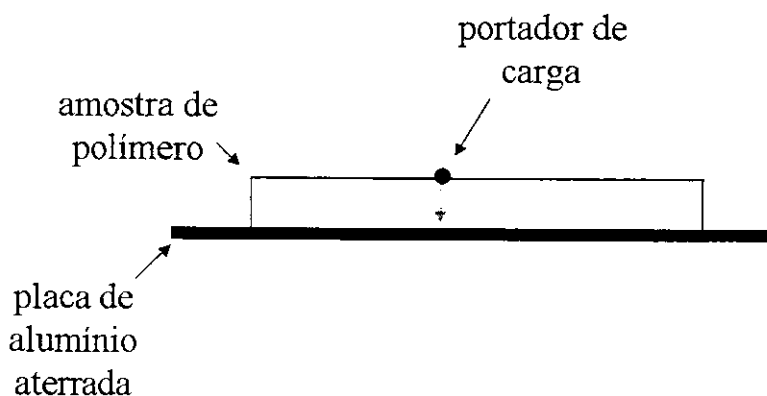


Figura 4.41: Esquema mostrando a hipótese de dissipação das cargas pela migração dos portadores de carga para a placa de alumínio^(43, 44).

A hipótese mostrada na figura 4.41 consiste, inicialmente, na sorção de íons na superfície da amostra seguida de uma migração das cargas em direção à placa de metal. Essa hipótese foi verificada no trabalho de Ieda, Sawa e Shinohara^(43, 44) e foi discutida em vários trabalhos posteriores^(35, 45-49). No entanto, nesses trabalhos, as amostras de polímero eram filmes com espessura de micrômetros enquanto que, aqui, as amostras utilizadas têm espessura de milímetros e isso poderia favorecer outros mecanismos de dissipação como a migração pela superfície da amostra e a transferência de cargas da amostra para o ar.

No experimento de geração de cargas triboelétricas em polietileno pelo atrito com papel, o mecanismo de dissipação seria o mesmo, no entanto, a eletrização ocorre de maneira diferente. A criação de cargas triboelétricas em isolantes pode ocorrer de três maneiras: pela transferência de elétrons, pela transferência de íons ou pela transferência de partículas portadoras de carga, como partículas de poeira eletrizadas⁽³⁾. A persistência dos potenciais, nesse experimento, por um tempo muito maior que nos experimentos com descarga sugere duas novas hipóteses: ou os portadores de carga formados na eletrização por atrito e na eletrização por descarga do dispositivo antiestático são diferentes ou os portadores de cargas gerados pelo atrito têm maior dificuldade para migrar pois podem, por exemplo, estar ligados às cadeias do polímero ou aprisionados em domínios cristalinos.

Os ensaios com imersão em líquidos mostraram que as cargas no polietileno podem ser dissipadas quase que totalmente com etanol ou clorofórmio. No entanto, não se sabe claramente como a dissipação das cargas ocorre. Lowell e Rose-Innes⁽³⁾ dizem que a carga em isolantes pode ser neutralizada expondo os materiais a um fluido fracamente condutor. Eles sugerem que a dissipação das cargas pode ocorrer quando íons existentes no

fluido, com sinal oposto ao sinal das cargas no isolante, são atraídos até sua superfície e podem retirar as cargas ali presentes deixando o isolante eletricamente neutro ou ficar ligados à superfície do isolante por forças eletrostáticas. Eles destacam que, se a segunda hipótese for verdadeira, os íons ligados à superfície do isolante podem ter uma influência significativa nos experimentos subseqüentes de eletrização, entretanto, essa questão permanece aberta à investigação.

5) Conclusão

O estudo da eletrização e dissipação de potenciais eletrostáticos em polímeros isolantes permitiu que várias informações preliminares fossem adquiridas e, com essas informações, foi definida uma metodologia experimental.

Inicialmente, observou-se que polímeros isolantes podem ser eletrizados de diversas maneiras, sendo que a eletrização pelo contato pode ocorrer com muita facilidade. Isso faz com que as etapas de preparação e manipulação das amostras tenham grande importância nos experimentos, sendo preferível que as amostras não precisem ser manipuladas logo antes da realização das medidas.

Os polímeros utilizados podem ser eletrizados com cargas positivas, cargas negativas e, simultaneamente, com ambos os tipos de cargas. Foi mostrado que, em polietileno, essa eletrização pode ser realizada de maneira controlada, sendo possível a criação de domínios ou gradientes elétricos em uma peça espessa.

A análise do decaimento de potenciais eletrostáticos em polietileno mostrou que regiões diferentes da superfície desse polímero dissipam os potenciais de maneiras diferentes. As derivadas das curvas de decaimento mostraram que uma mesma região de uma amostra pode apresentar diferentes padrões de decaimento mas não foi encontrada correlação entre os padrões de decaimento e o potencial eletrostático inicial. Também foi observado que essas derivadas não variam monotonicamente com o tempo e que a taxa de dissipação dos potenciais pode aumentar ou diminuir, em módulo, no início do decaimento, tendendo a zero em seguida.

A comparação entre as curvas de decaimento de polietileno eletrizado com o dispositivo antiestático e pelo atrito com papel mostrou que a persistência dos potenciais varia com o método de eletrização. São necessárias dezenas de horas para a dissipação dos potenciais gerados pelo primeiro método e centenas de horas para a dissipação dos potenciais gerados no atrito com papel.

Além disso, os potenciais eletrostáticos em polietileno podem ser dissipados efetivamente através da imersão em etanol ou clorofórmio seguida de secagem do polímero sob atmosfera ambiente. Esse resultado confirma observações anteriores, mas também mostra que a dissipação de carga não é apenas uma consequência da polaridade ou da condutividade do líquido.

6) Referências

- (1) Moore, A. D.; *Electrostatics and its applications*; John Wiley & Sons; Nova York; **1973**.
- (2) Bailey, A. G.; The charging of insulator surfaces; *Journal of Electrostatics*; 51-52; **2001**; 82-90.
- (3) Lowell, J.; Rose-Innes, A. C.; Contact electrification; *Advances in Physics*; 29 (6); **1980**; 947-1023.
- (4) Taylor, D. M.; Secker, P. E.; *Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements*; Research Studies Press; **1994**.
- (5) Kronik, L.; Shapira, Y.; Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications; *Surface Science Reports*; 37; **1999**; 1-206.
- (6) Cahen, D.; Dahn, A.; Electron energetics at surfaces and interfaces: concepts and experiments; *Advanced Materials*; 15 (4); **2003**; 271-277.
- (7) Diaz, A. F.; Guay, J.; Contact charging of organic materials – Ion vs. electron-transfer; *IBM Journal of Research and Development*; 37 (2); **1993**; 249-259.
- (8) <http://www.esdjournal.com/>, consultado em 29/10/2004.
- (9) Castle, G. S. P.; Industrial applications of electrostatics: the past, present and future; *Journal of Electrostatics*; 51-52; **2001**; 1-7.
- (10) Galembeck, A.; Costa, C. A. R.; da Silva, M. C. V. M.; Souza, E. F.; Galembeck, F.; Scanning electric potential microscopy imaging of polymers: electrical charge distribution in dielectrics; *Polymer*; 42; **2001**; 4845-4851.
- (11) Cardoso, A. H.; Leite, C. A. P., Galembeck, F.; Elemental distribution within single latex particles: determination by electron spectroscopy; *Langmuir*; 14 (12), **1998**, 3187-3194.
- (12) Cardoso, A. H.; Leite, C. A. P., Galembeck, F.; Latex particle self-assembly and particle microchemical symmetry: PS/HEMA latex particles are intrinsic dipoles; *Langmuir*; 15 (13), **1999**, 4447-4453.
- (13) Gouveia, R. F.; Costa, C. A. R.; Galembeck, F.; Electrostatic patterning of a silica surface: a new model for charge build-up on a dielectric solid; *Journal of Physical Chemistry B*; 109 (10), 2005, 4631-4637.
- (14) <http://www.2spi.com/catalog/photo/zerostat.shtml>, consultado em 21/12/2004.
- (15) Norrish, R. S.; An equation for the activity coefficients and equilibrium relative humidities of water in confectionery syrups; *Journal of Food Technology*; 1; **1966**; 25-39.

- (16) Noras, M. A.; Non-contact surface charge/voltage measurements: Capacitive probe – principle of operation; *Trek Application Note Number 3001*; **2002**.
- (17) Thomson, W. (Lord Kelvin); Contact electricity of metals; *Philosophical Magazine*; 46; **1898**; 82-120 apud Kronik, L.; Shapira, Y.; Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications; *Surface Science Reports*; 37; **1999**; 1-206.
- (18) Zisman, W. A.; A new method of measuring contact potential differences in metals; *Review of Scientific Instruments*; 3; **1932**; 367-370.
- (19) Baikie, I. D.; Venderbosch, E.; Analysis of stray capacitance in the Kelvin method; *Review of Scientific Instruments*; 62; **1991**; 725-735.
- (20) D'Arcy, R. J.; Surplice, N. A.; The effects of stray capacitance on the Kelvin method for measuring contact potential difference; *Journal of Physics D: Applied Physics*; 3; **1970**; 482-488.
- (21) Baikie, I. D.; Mackenzie, S.; Estrup, P. J. Z.; Meyer, J. A.; Noise and the Kelvin method; *Review of Scientific Instruments*; 62; **1991**; 1326-1332.
- (22) Noras, M. A.; Trek electrostatic voltmeters: Setup, environment, working conditions; *Trek Application Note Number 3003*; **2002**.
- (23) Ritty, B.; Wachtel, F.; Manquenouille, R.; Ott, F.; Donnet, J. B.; Conditions necessary to get meaningful measurements from the Kelvin method; *Journal of Physics E: Scientific Instruments*; 15; **1982**; 310-317.
- (24) de Boer, J. S. W.; Krusemeyer, H. J.; Burhoven Jaspers, N. C.; Analysis and improvement of the Kelvin method for measuring differences in work function; *Review of Scientific Instruments*; 44; **1973**; 1003-1008.
- (25) Hadjadj, A.; Roca i Cabarrocas, P.; Equer, B.; Analytical compensation of stray capacitance effect in Kelvin probe measurements; *Review of Scientific Instruments*; 66; **1995**; 5272-5276.
- (26) Baumgärtner, H.; Liess, H. D.; Micro Kelvin probe for local work-function measurements; *Review of Scientific Instruments*; 59; **1988**; 802-805.
- (27) Surplice, N. A.; D'Arcy, R. J.; A critique of the Kelvin method of measuring work functions; *Journal of Physics E: Scientific Instruments*; 3; **1970**; 477-482.
- (28) Camp, J. B.; Darling, T. W.; Brown, R. E.; Macroscopic Variations of surface potentials of conductors; *Journal of Applied Physics*; 69; **1991**; 7126-7129.
- (29) Luo, G. -N.; Yamaguchi, K.; Terai, T.; Yamawaki, M.; Influence of space charge on the performance of the Kelvin probe; *Review of Scientific Instruments*; 72; **2001**; 2350-2356.
- (30) Baikie, I. D.; Estrup, P. J.; Low cost PC based Scanning Kelvin probe; *Review of Scientific Instruments*; 69; **1998**; 3902-3907.

- (31) Cavalcoli, D.; Cavallini, A.; Rossi, M.; Binetti, S.; Izzia, F.; Pizzini, S.; Surface contaminant detection in semiconductors using noncontacting techniques; *Journal of the Electrochemical Society*; 150; **2003**; G456-G460.
- (32) Rühle, S.; Cahen, D.; Contact-free photovoltage measurements of photoabsorbers using a Kelvin probe; *Journal of Applied Physics*; 96; **2004**; 1556-1562.
- (33) Juzeliunas, E.; Leinartas, K.; Fürbeth, W.; Jüttner, K.; Study of initial stages of Al-Mg alloy corrosion in water, chloride and Cu(II) environment by a scanning Kelvin probe; *Corrosion Science*; 45; **2003**; 1939-1950.
- (34) Sueva, D.; Georgiev, S. S.; Iliev, L.; Nedev, N.; Toneva, A.; Sensitivity of the a-Si:H/c-Si structure to alcohol vapors; *Sensors and Actuators B: Chemical*; 82; **2002**; 180-185.
- (35) Sahli, S.; Bellel, A.; Ziari, Z.; Kahlouche, A.; Segui, Y.; Measure and analysis of potential decay in polypropylene films after negative corona charge deposition; *Journal of Electrostatics*; 57; **2003**; 169-181.
- (36) Moreno, R. A.; Gross, B.; Measurement of potential buildup and decay, surface charge density, and charging currents of corona-charged polymer foil electrets; *Journal of Applied Physics*; 47 (8); **1976**; 3397-3402.
- (37) Giacometti, J. A.; Campos, J. S. C.; Constant current corona triode with grid voltage control. Application to polymer foil charging; *Review of Scientific Instruments*; 61 (3); **1990**; 1143-1150.
- (38) Baikie, I. D.; van der Werf, K. O.; Oerbekke, H.; Broeze, J.; van Silfhout, A.; Automatic Kelvin probe compatible with ultrahigh vacuum; *Review of Scientific Instruments*; 60; **1989**; 930-934.
- (39) Nowotny, J.; Sloma, M.; Weppner, W.; High-temperature Kelvin probe in application to ceramic materials – investigation of nickel-oxide; *Journal of the American Ceramic Society*; 72; **1989**; 564-570.
- (40) Nonnenmacher, M.; O'Boyle, M. P.; Wickramasinghe, J. K.; Kelvin probe force microscopy; *Applied Physics Letters*; 58; **1991**; 2921-2923.
- (41) Blum, R.; Roller, D. E.; *Physics volume 2: Electricity, Magnetism, and Light*; Holden-Day; São Francisco; **1982**.
- (42) Maxwell, J. C.; *A Treatise on Electricity & Magnetism*; Volume 1; 3^a edição; Dover Publications; **1954**.
- (43) Ieda, M.; Sawa, G.; Shinohara, U.; A decay process of surface electric charges across polyethylene film; *Japanese Journal of Applied Physics*; 6 (6); **1967**; 793-794.
- (44) Ieda, M.; Sawa, G.; Shinohara, U.; Decay of electric charges on polymeric films; *Electrical Engineering in Japan*; 88 (6); **1968**; 67-73.

-
- (45) Sonnonstine, T. J.; Perlman, M. M.; Surface-potential decay in insulators with field-dependent mobility and injection efficiency; *Journal of Applied Physics*; 46 (9); **1975**; 3975-3981.
- (46) Batra, I. P.; Kanazawa, K. K.; Crossover effect in surface potential decay; *Japanese Journal of Applied Physics*; 10 (5); **1972**; 267-268.
- (47) Baum, E. A.; Lewis, T. J.; Toomer, R.; Decay of electrical charge on polyethylene films; *Journal of Physics D: Applied Physics*; 10; **1977**; 487-497.
- (48) Wintle, H. J.; Decay of static electrification by conduction processes in polyethylene; *Journal of Applied Physics*; 41 (10); **1970**; 4004-4007.
- (49) Kasap, S. O.; Bhattacharyya, A.; Liang, Z.; Decay of electrostatic surface potential on insulators via charge injection, transport and trapping; *Japanese Journal of Applied Physics*; 31; **1992**; 72-80.

Apêndice A

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra I cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.10a. Foram aplicadas 2 descargas positivas com o dispositivo antiestático, a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.

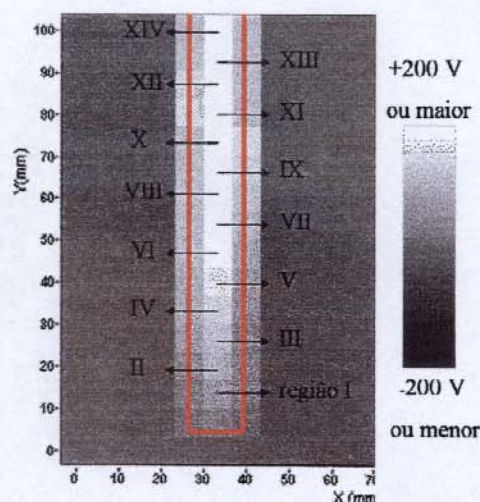


Figura A1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

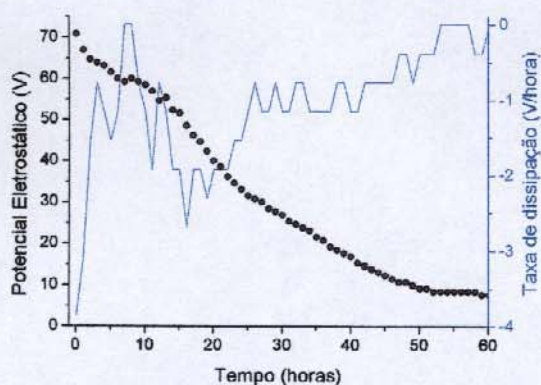


Figura A2: Curva de decaimento e derivada da região I.

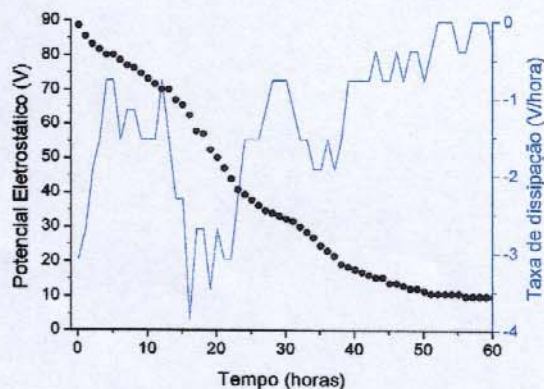


Figura A3: Curva de decaimento e derivada da região II.

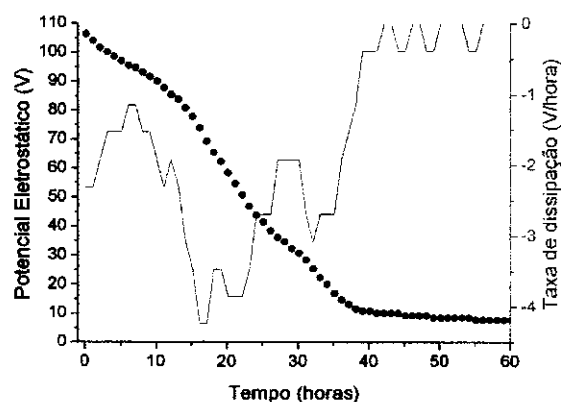


Figura A4: Curva de decaimento e derivada da região III.

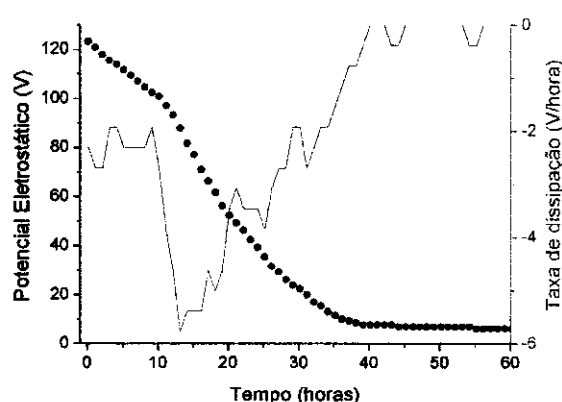


Figura A5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

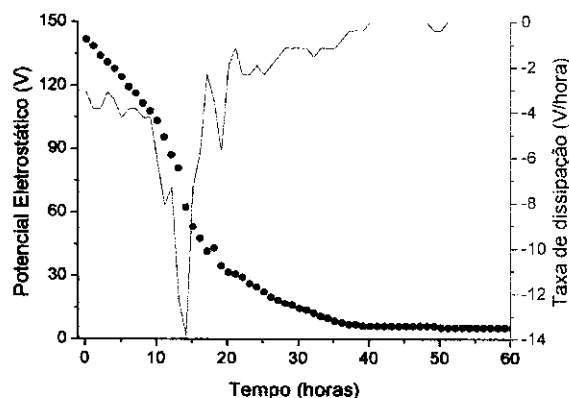


Figura A6: Curva de decaimento e derivada da região V.

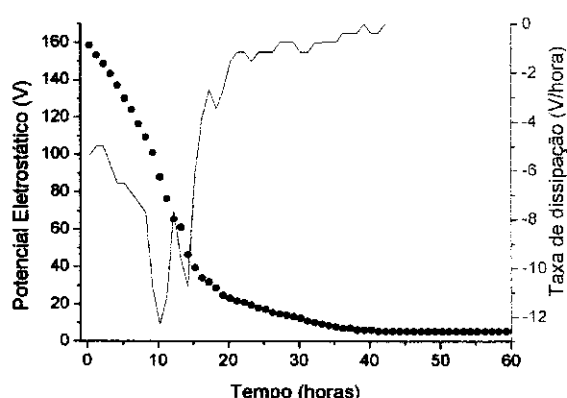


Figura A7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

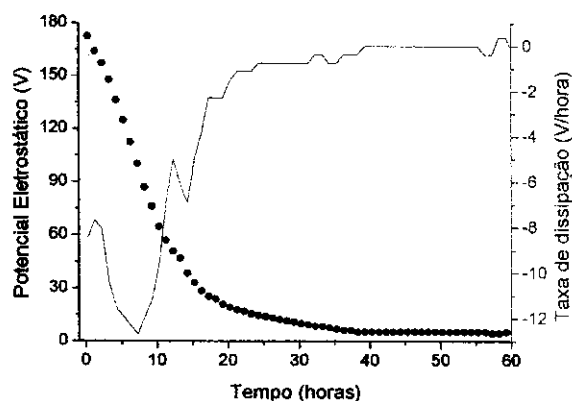


Figura A8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

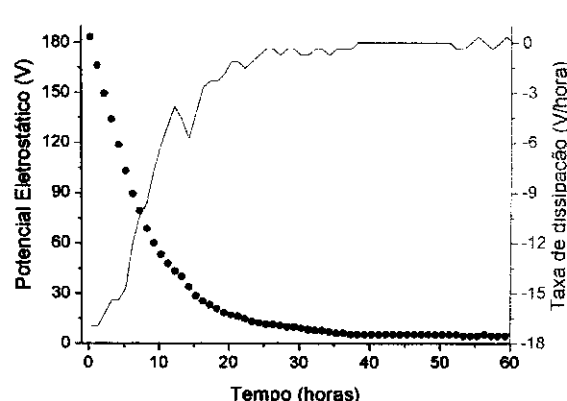


Figura A9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

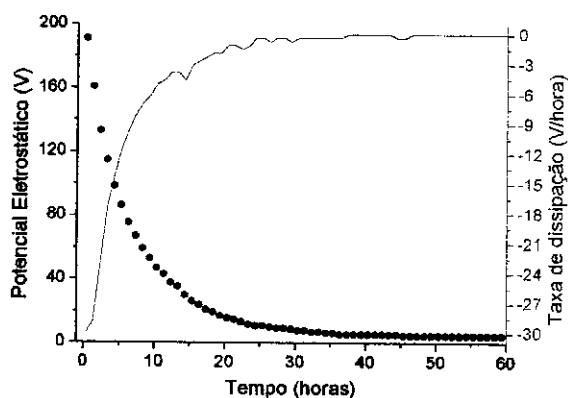


Figura A10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

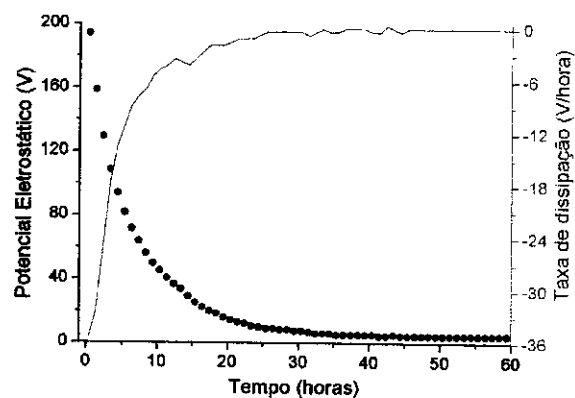


Figura A11: Curva de decaimento e derivada da região X.

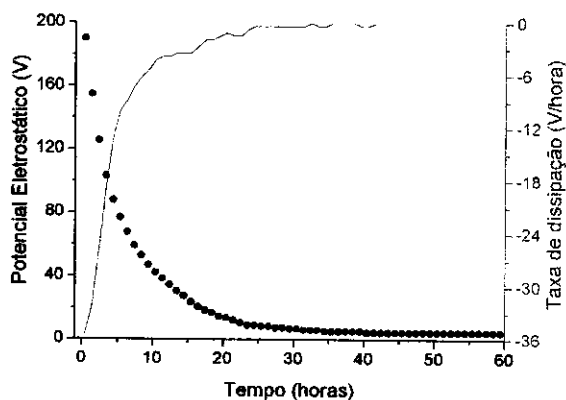


Figura A12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

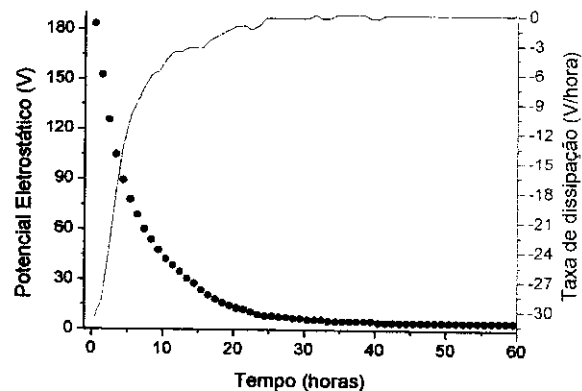


Figura A13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

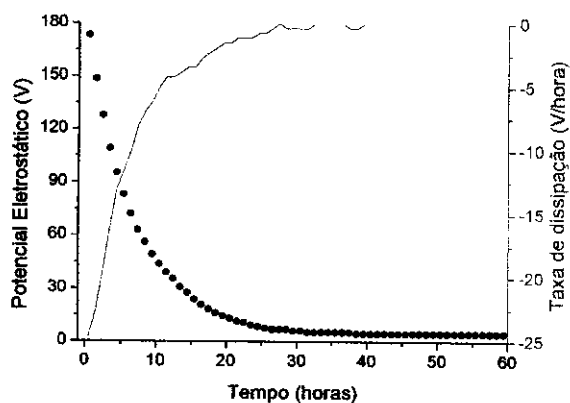


Figura A14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

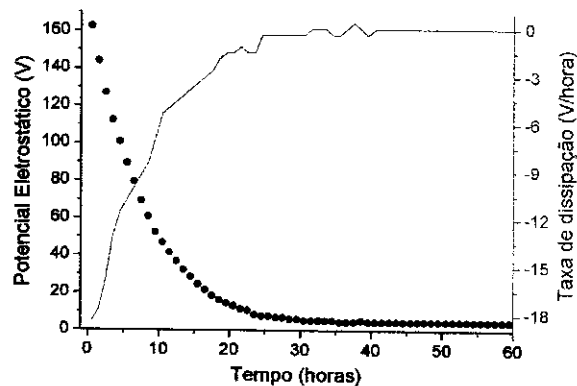


Figura A15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.

Apêndice B

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra I cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.10b. Foram aplicadas 2 descargas positivas com o dispositivo antiestático, a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.

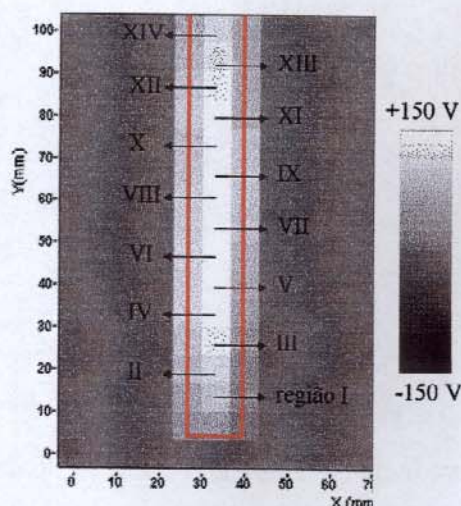


Figura B1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

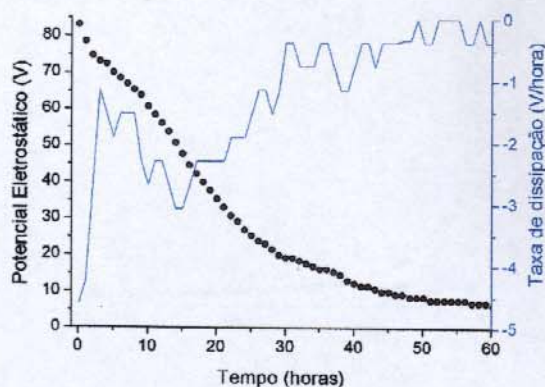


Figura B2: Curva de decaimento e derivada da região I.

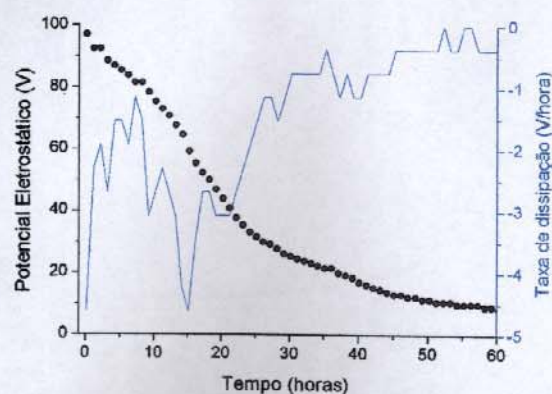


Figura B3: Curva de decaimento e derivada da região II.

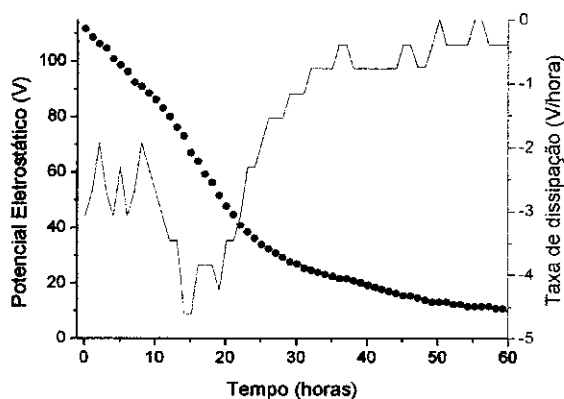


Figura B4: Curva de decaimento e derivada da região III.

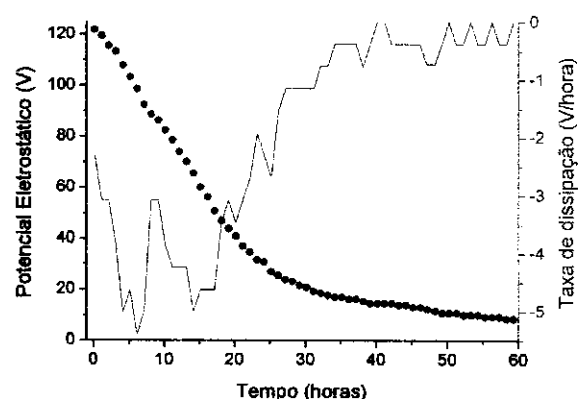


Figura B5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

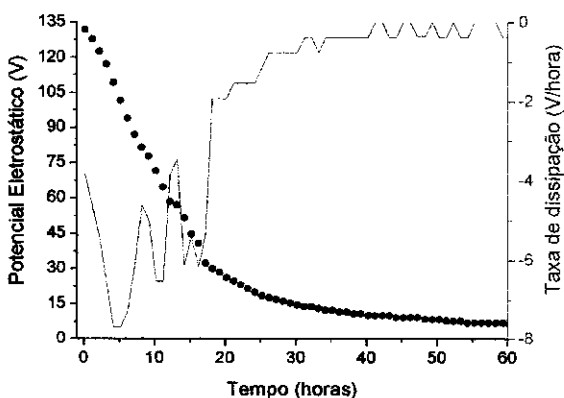


Figura B6: Curva de decaimento e derivada da região V.

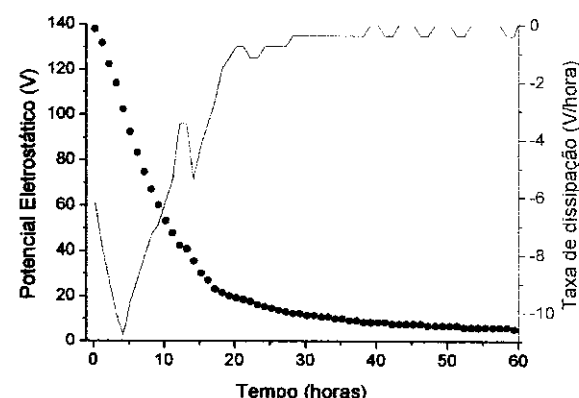


Figura B7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

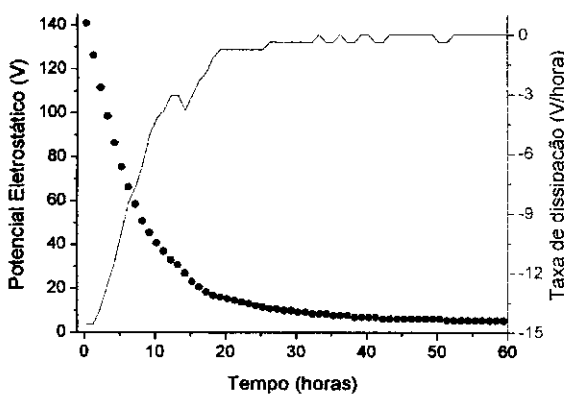


Figura B8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

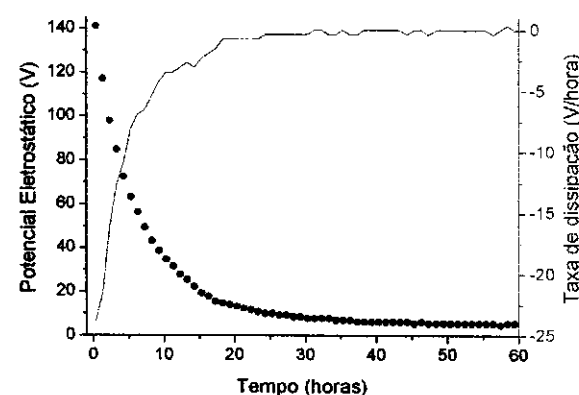


Figura B9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

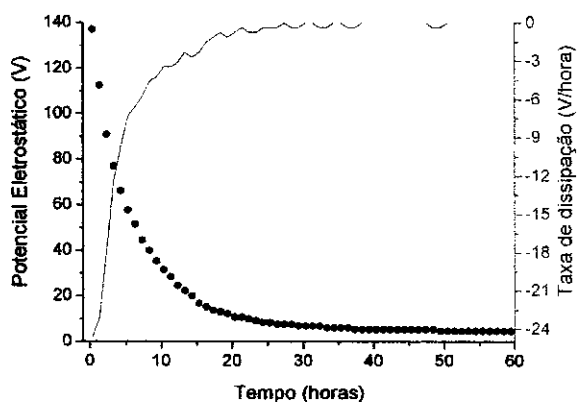


Figura B10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

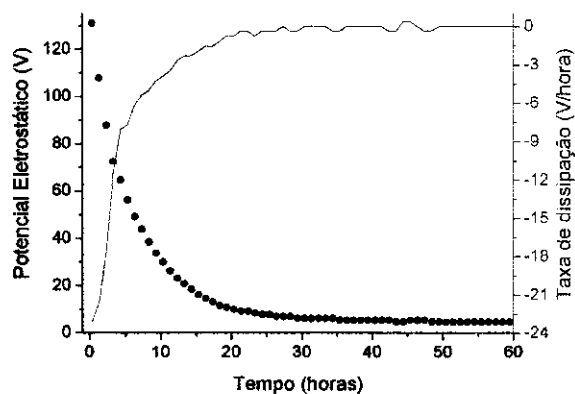


Figura B11: Curva de decaimento e derivada da região X.

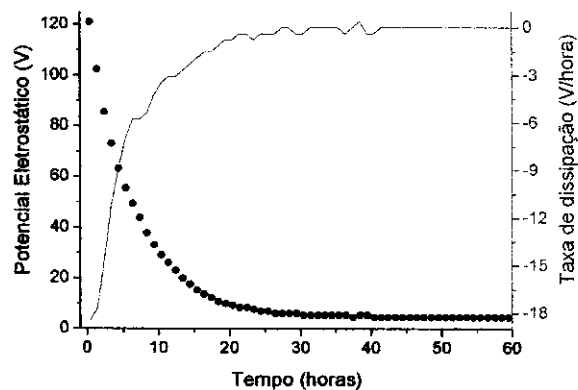


Figura B12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

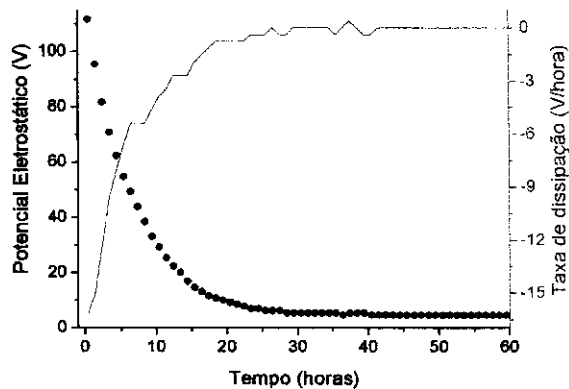


Figura B13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

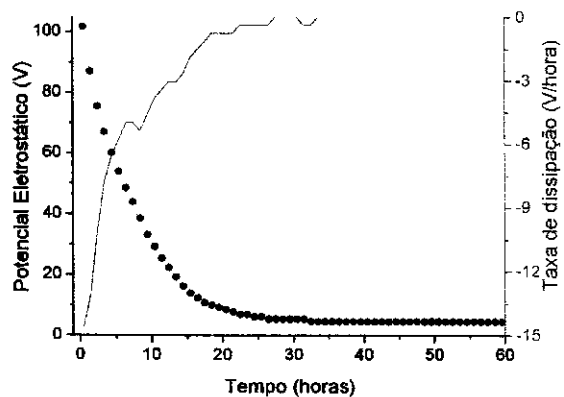


Figura B14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

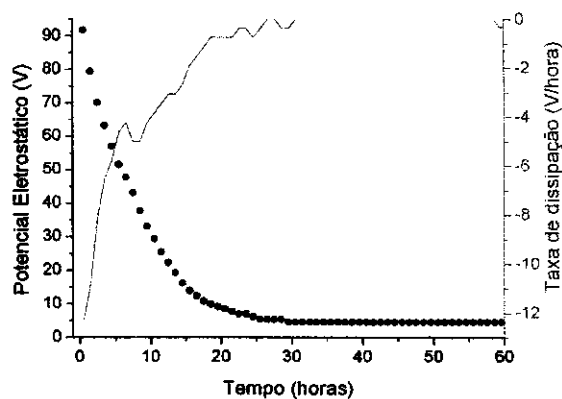


Figura B15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.

Apêndice C

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra I cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.10c. Foi aplicada 1 descarga positiva com o dispositivo antiestático, a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.

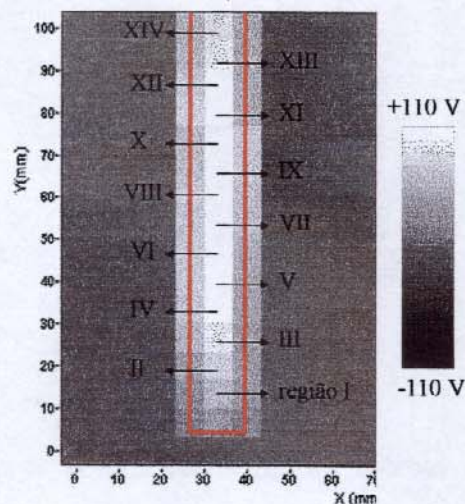


Figura C1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

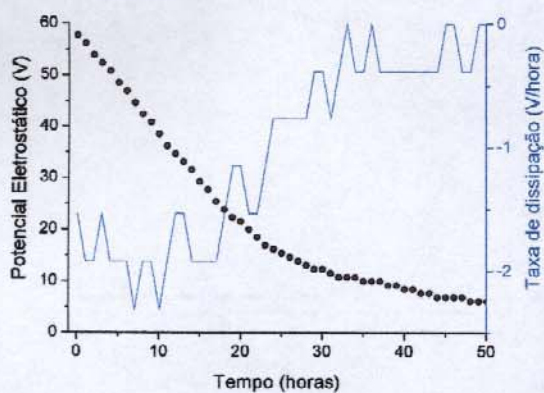


Figura C2: Curva de decaimento e derivada da região I.

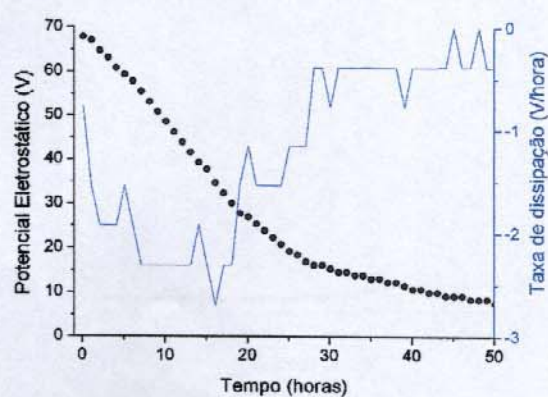


Figura C3: Curva de decaimento e derivada da região II.

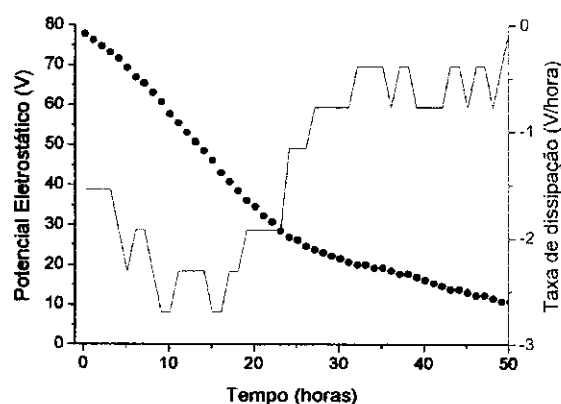


Figura C4: Curva de decaimento e derivada da região III.

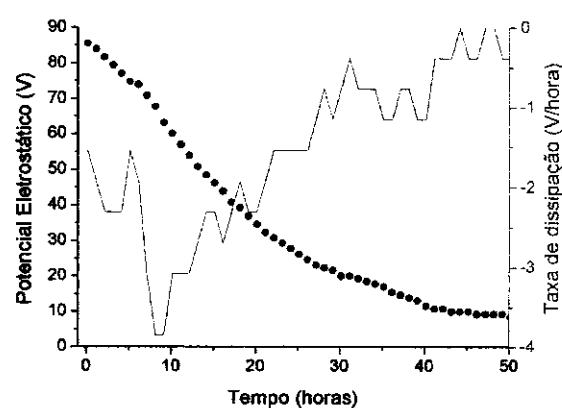


Figura C5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

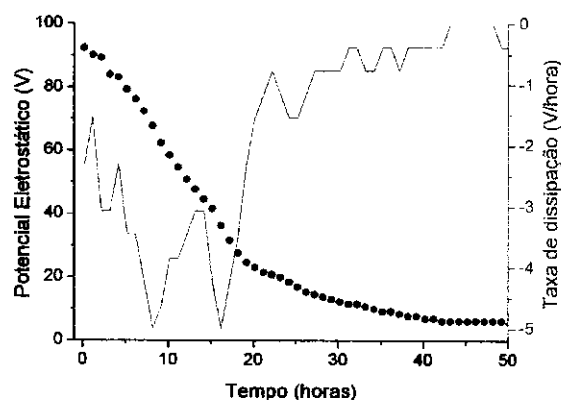


Figura C6: Curva de decaimento e derivada da região V.

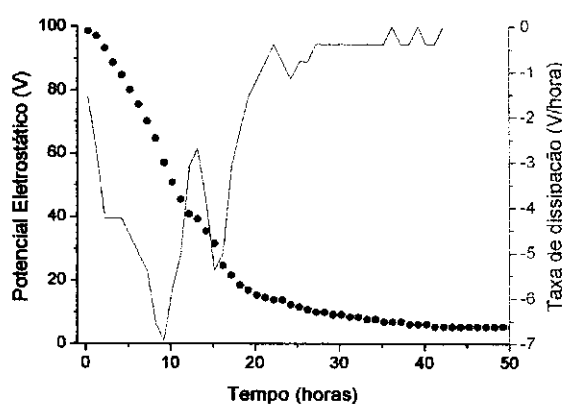


Figura C7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

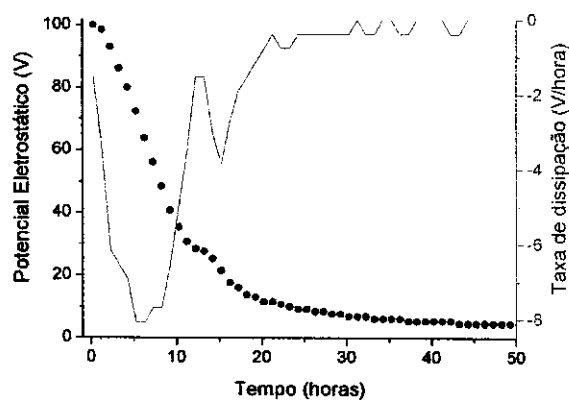


Figura C8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

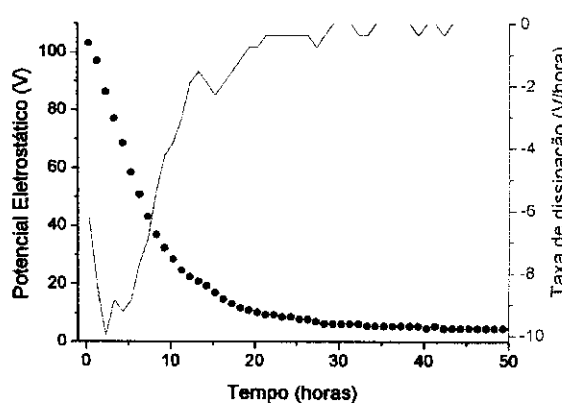


Figura C9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

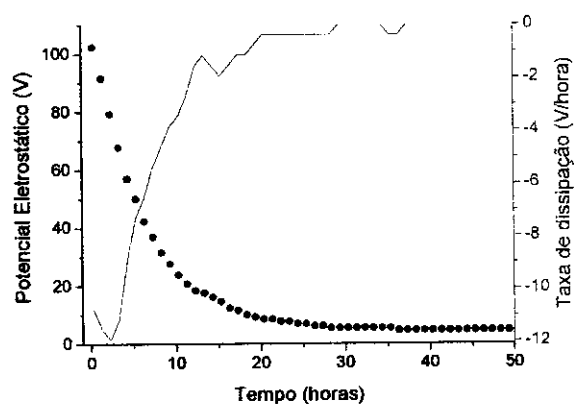


Figura C10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

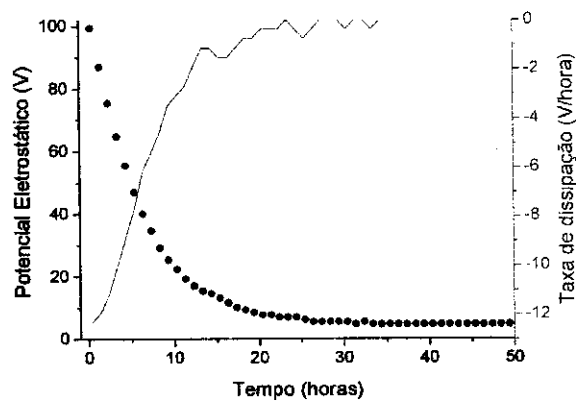


Figura C11: Curva de decaimento e derivada da região X.

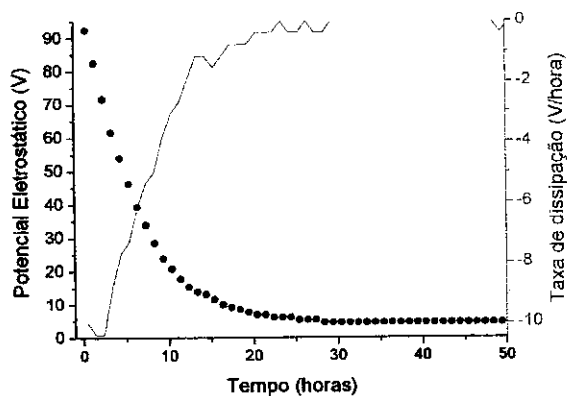


Figura C12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

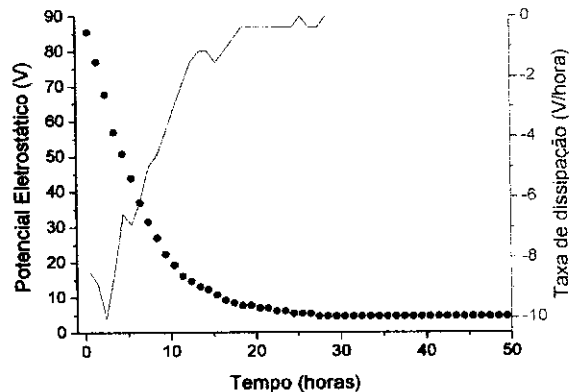


Figura C13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

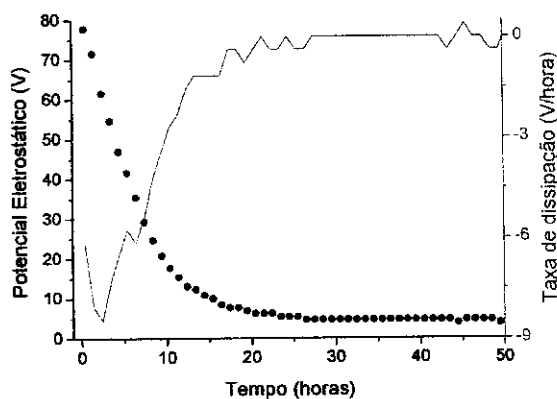


Figura C14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

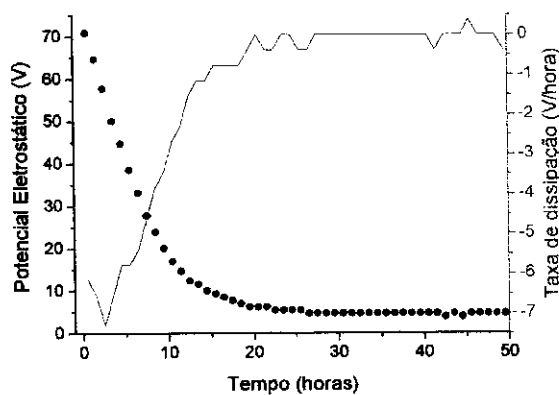


Figura C15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.

Apêndice D

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra I cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.10d. Foram aplicadas 2 descargas positivas com o dispositivo antiestático, a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.

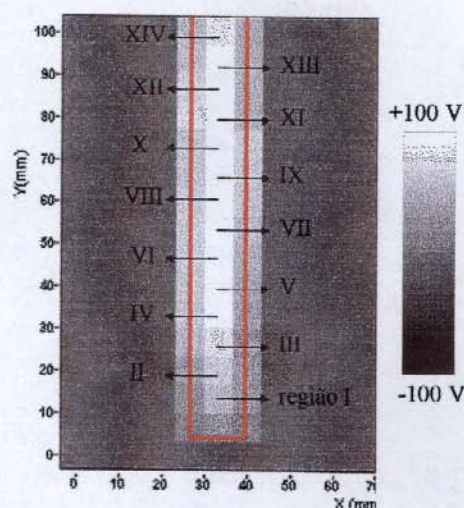


Figura D1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

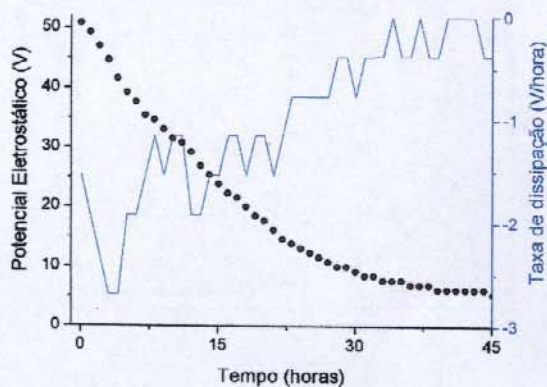


Figura D2: Curva de decaimento e derivada da região I.

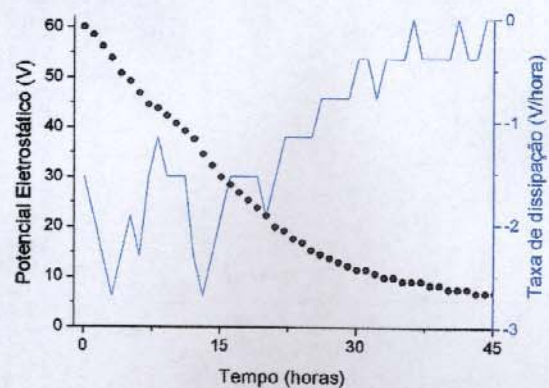


Figura D3: Curva de decaimento e derivada da região II.

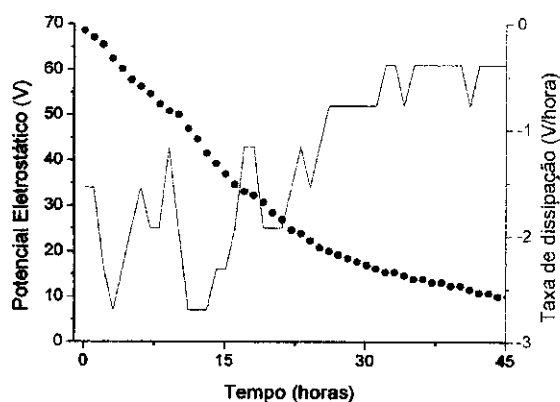


Figura D4: Curva de decaimento e derivada da região III.

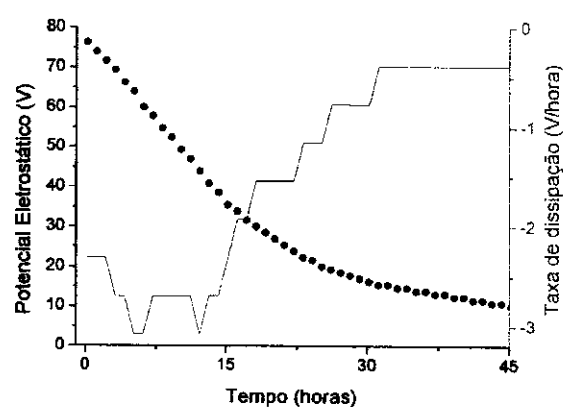


Figura D5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

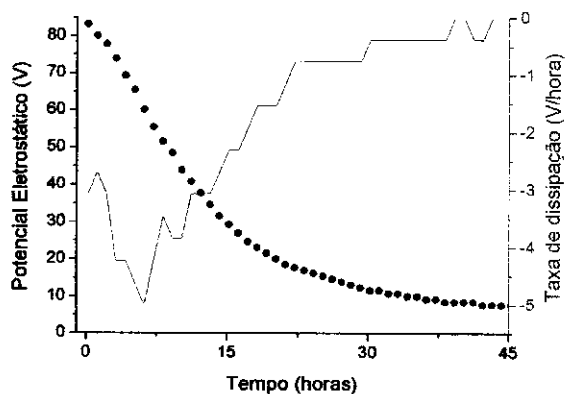


Figura D6: Curva de decaimento e derivada da região V.

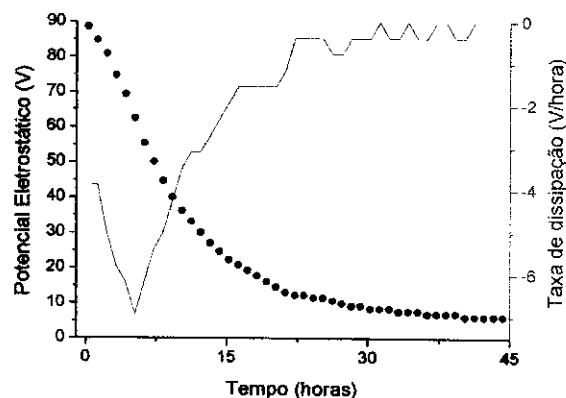


Figura D7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

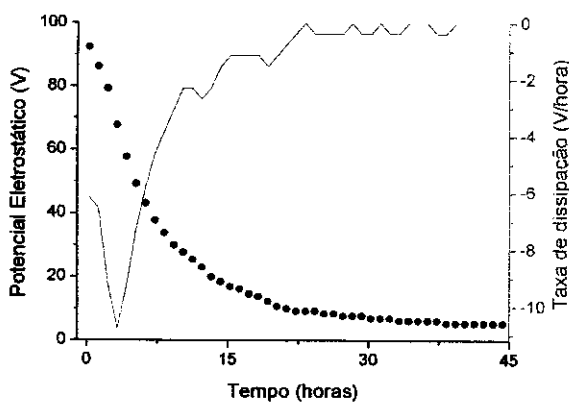


Figura D8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

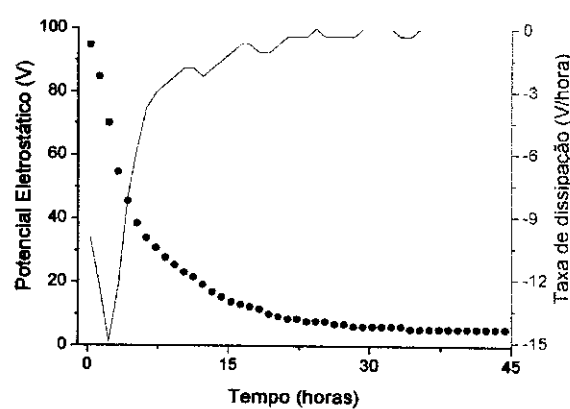


Figura D9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

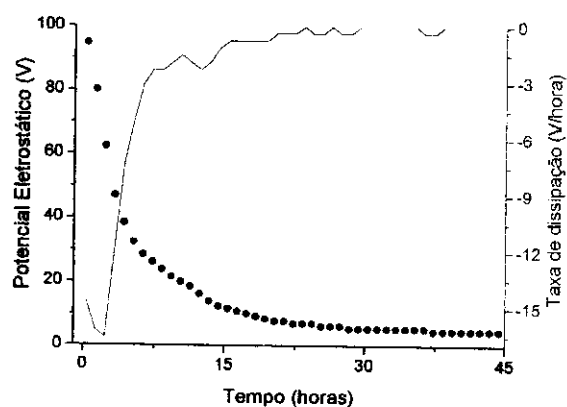


Figura D10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

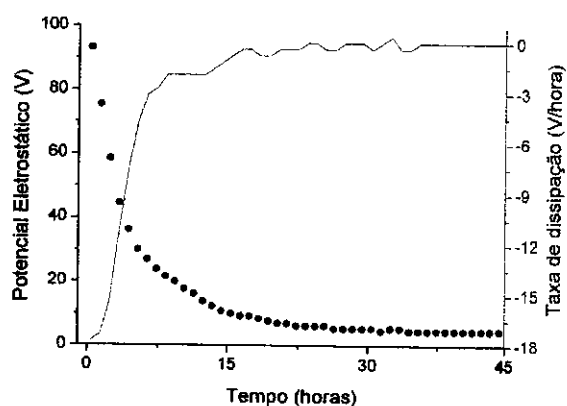


Figura D11: Curva de decaimento e derivada da região X.

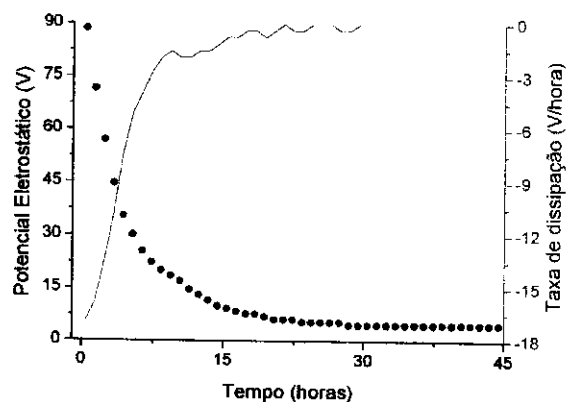


Figura D12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

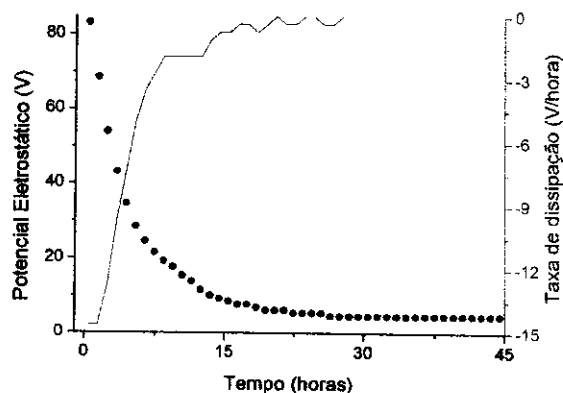


Figura D13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

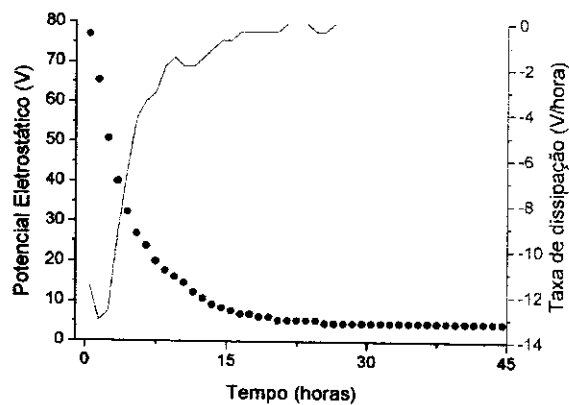


Figura D14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

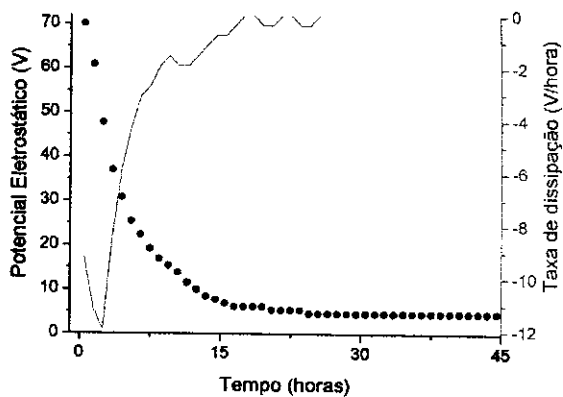


Figura D15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.

Apêndice E

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra I cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.31a. Foi aplicada 1 descarga negativa com o dispositivo antiestático, a 20 cm de altura sobre o centro da amostra.

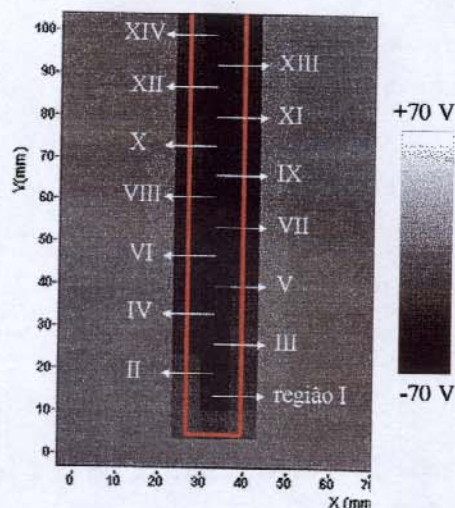


Figura E1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

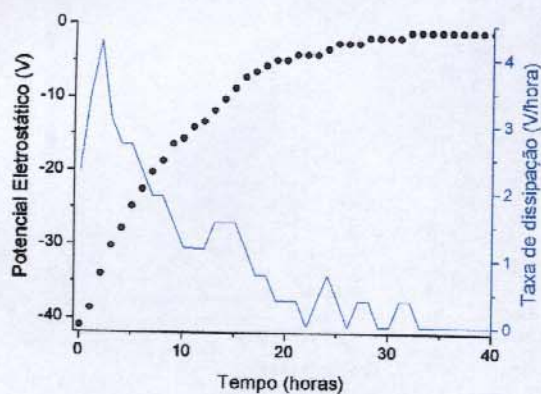


Figura E2: Curva de decaimento e derivada da região I.

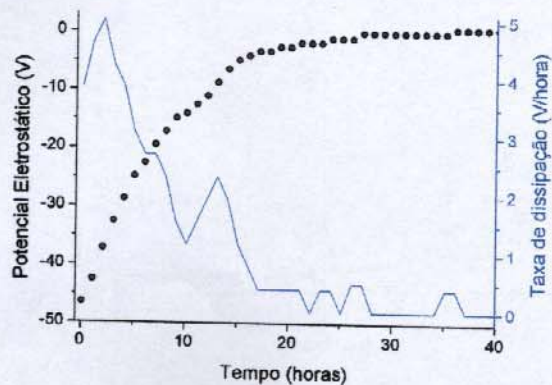


Figura E3: Curva de decaimento e derivada da região II.

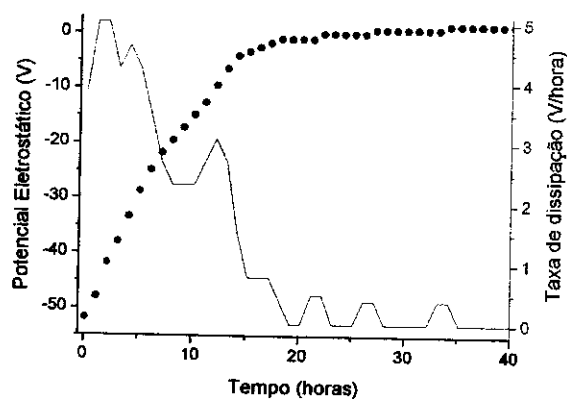


Figura E4: Curva de decaimento e derivada da região III.

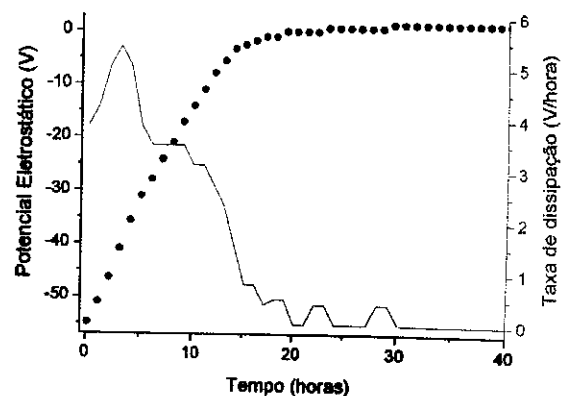


Figura E5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

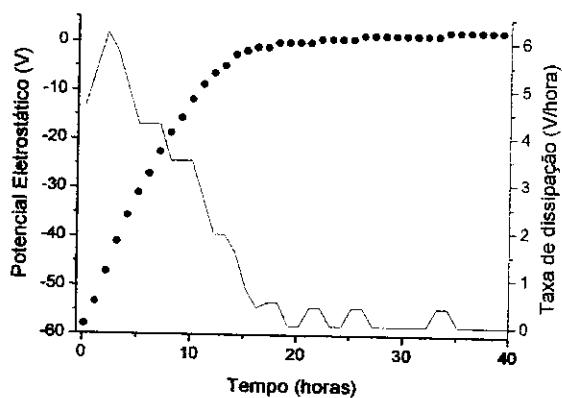


Figura E6: Curva de decaimento e derivada da região V.

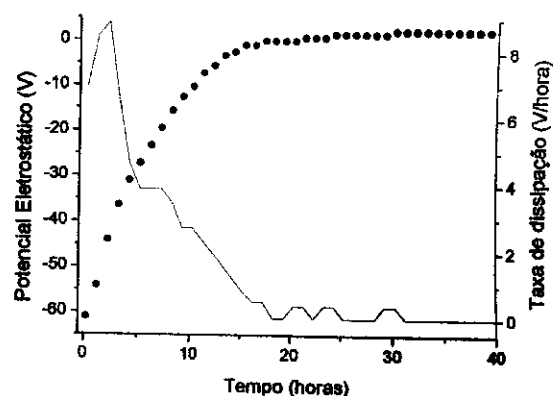


Figura E7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

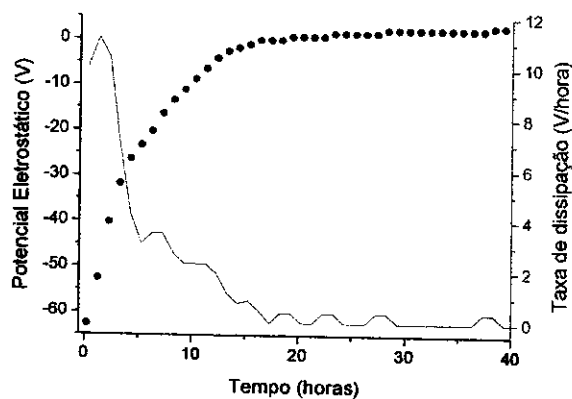


Figura E8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

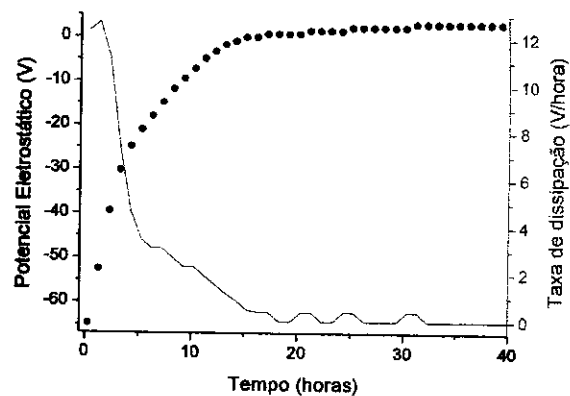


Figura E9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

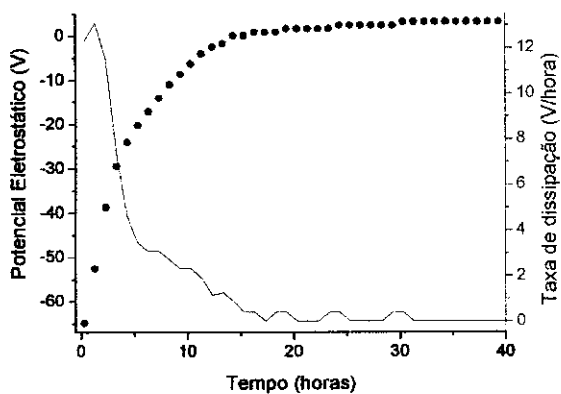


Figura E10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

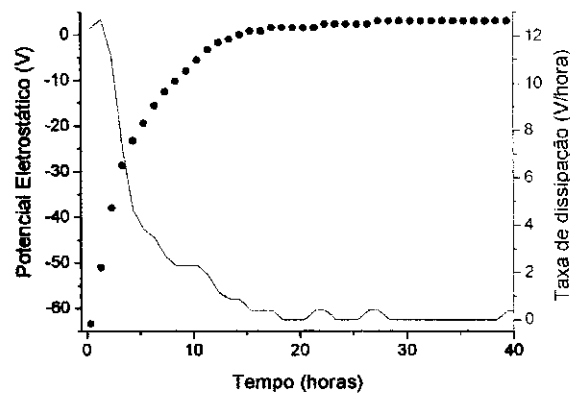


Figura E11: Curva de decaimento e derivada da região X.

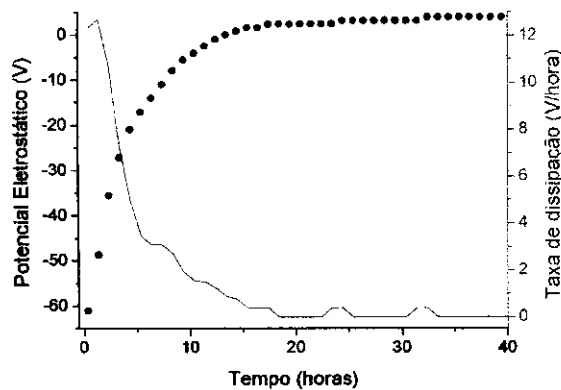


Figura E12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

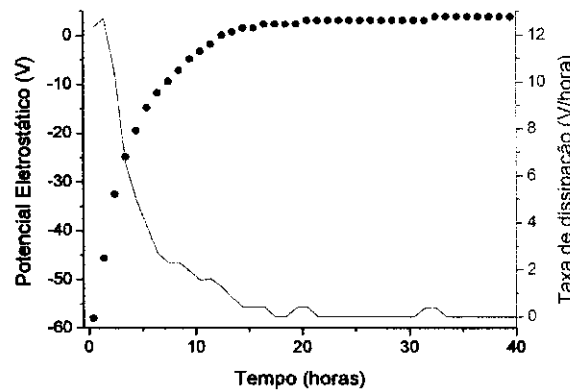


Figura E13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

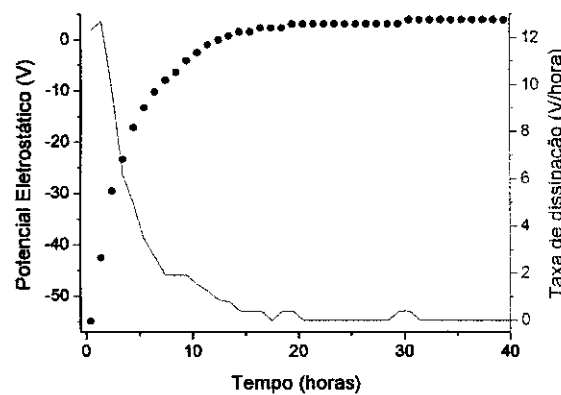


Figura E14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

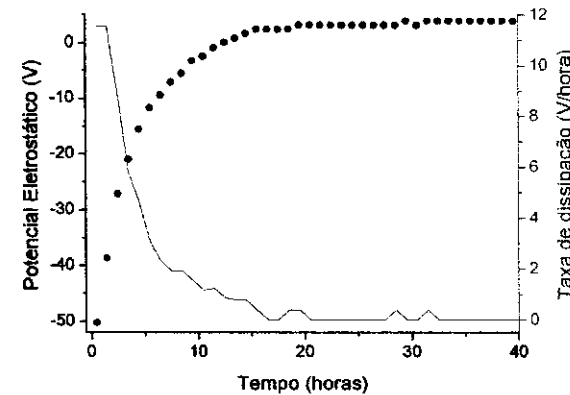


Figura E15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.

Apêndice F

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra I cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.31b. Foi aplicada 1 descarga negativa com o dispositivo antiestático, a 17 cm de altura sobre o centro da amostra.

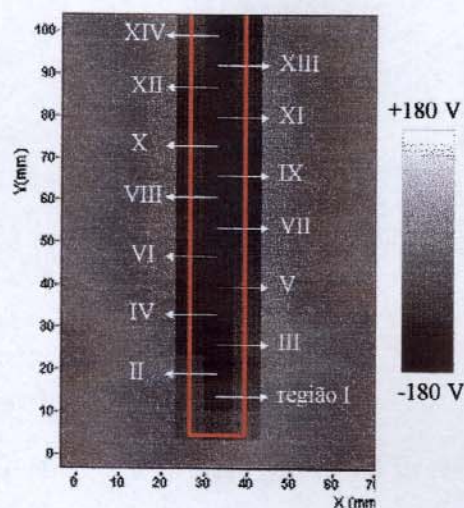


Figura F1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

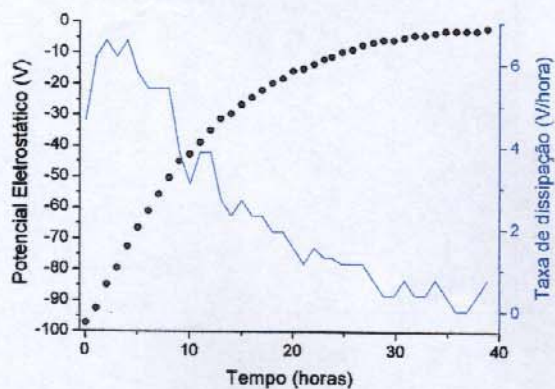


Figura F2: Curva de decaimento e derivada da região I.

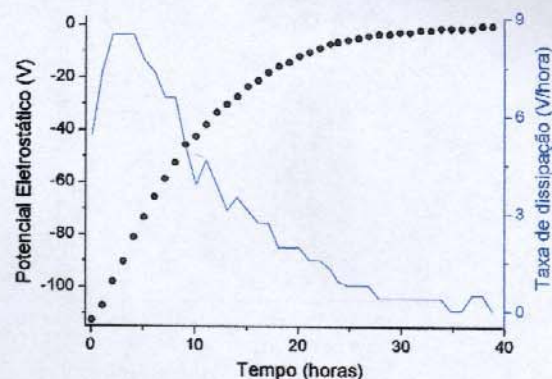


Figura F3: Curva de decaimento e derivada da região II.

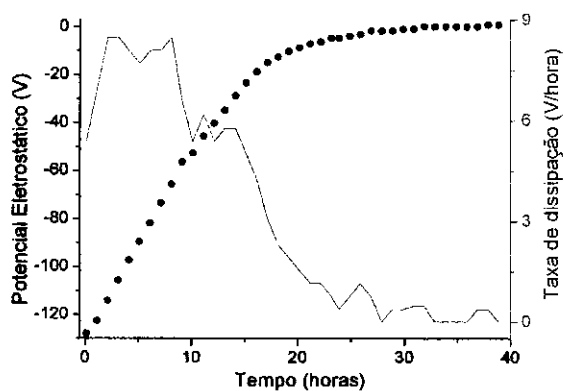


Figura F4: Curva de decaimento e derivada da região III.

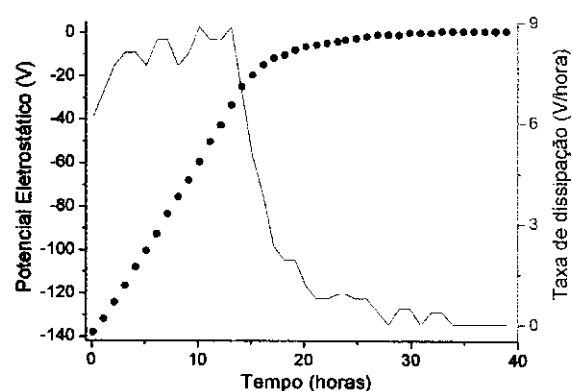


Figura F5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

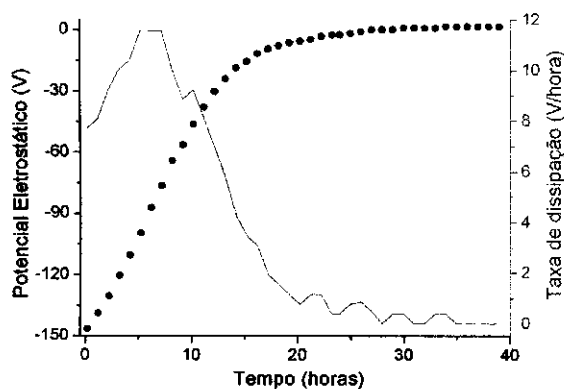


Figura F6: Curva de decaimento e derivada da região V.

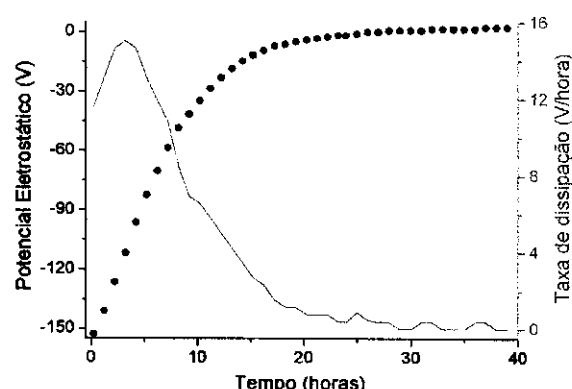


Figura F7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

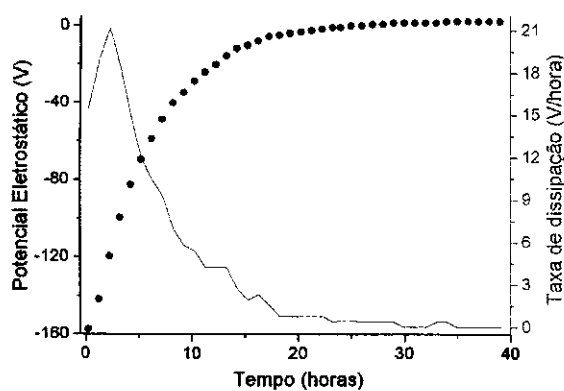


Figura F8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

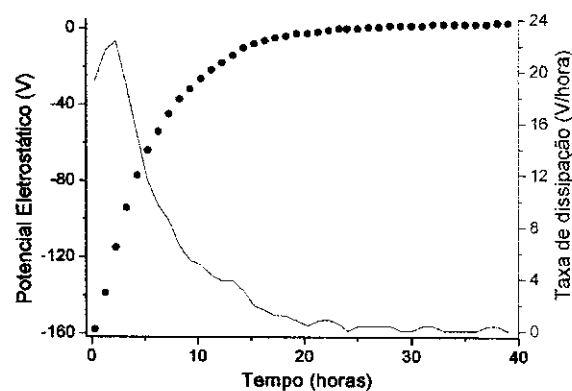


Figura F9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

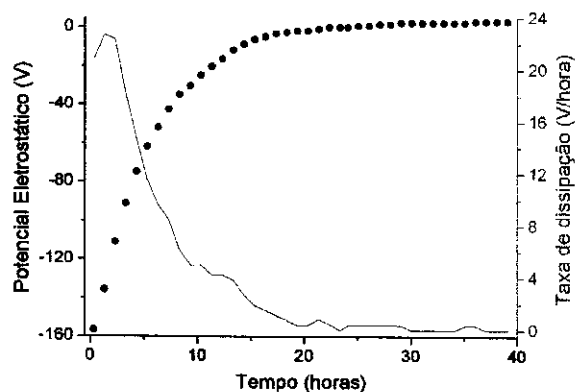


Figura F10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

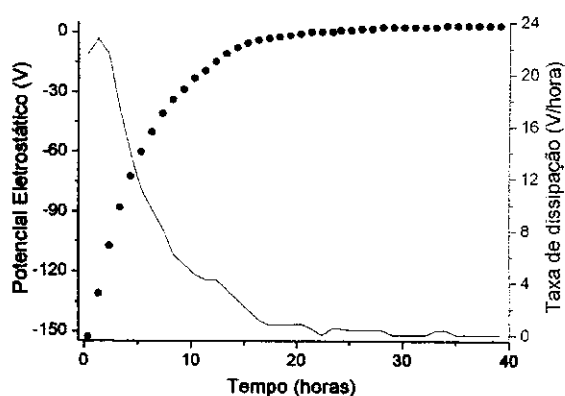


Figura F11: Curva de decaimento e derivada da região X.

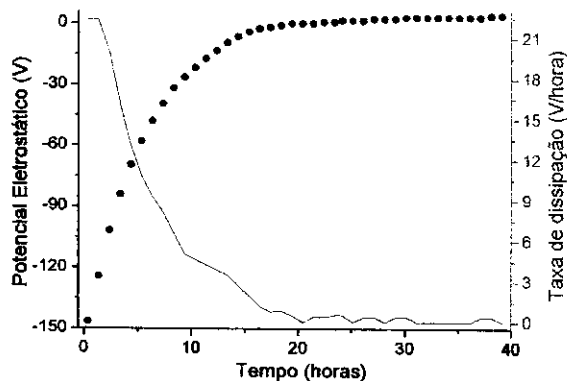


Figura F12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

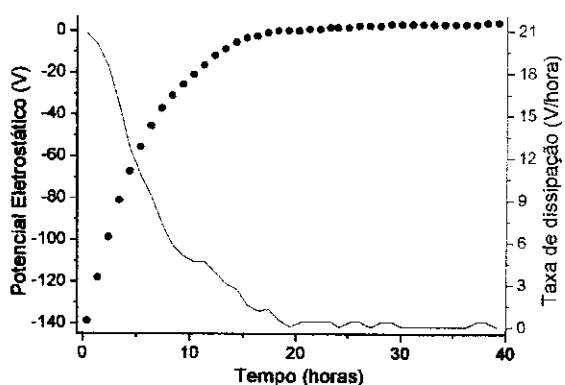


Figura F13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

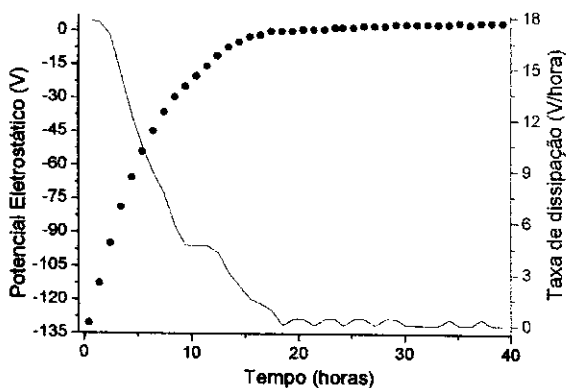


Figura F14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

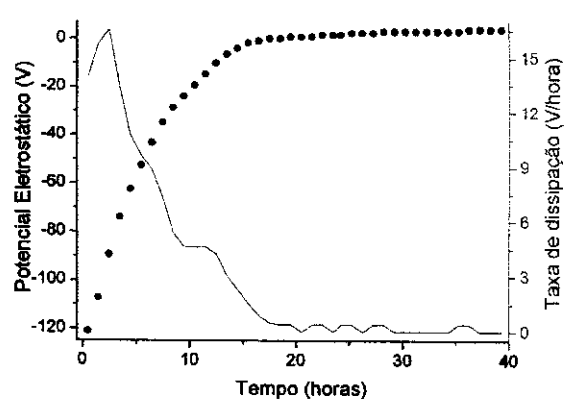


Figura F15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.

Apêndice G

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra II cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.28. Foi aplicada 1 descarga positiva com o dispositivo antiestático, a 10 cm de altura sobre o centro da amostra.

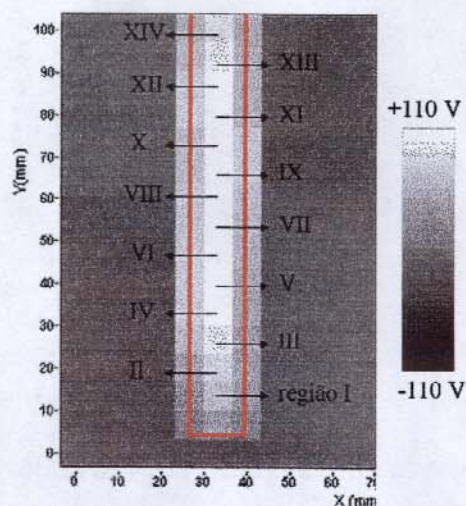


Figura G1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

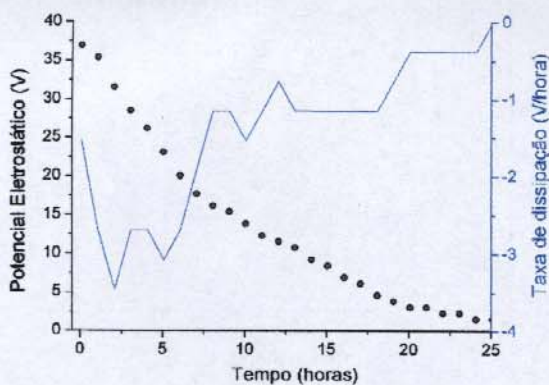


Figura G2: Curva de decaimento e derivada da região I.

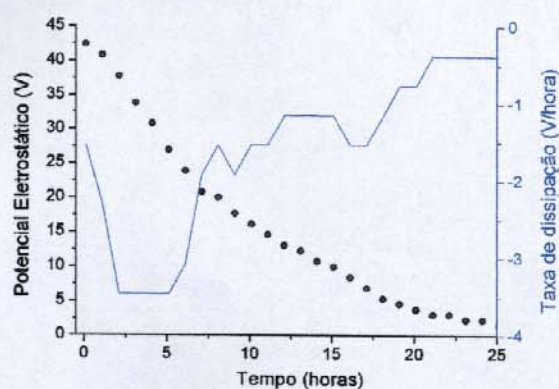


Figura G3: Curva de decaimento e derivada da região II.

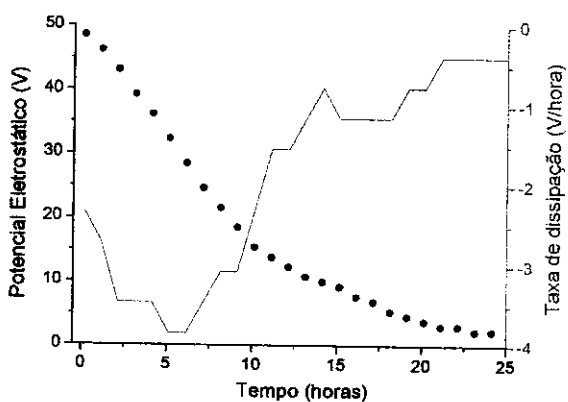


Figura G4: Curva de decaimento e derivada da região III.

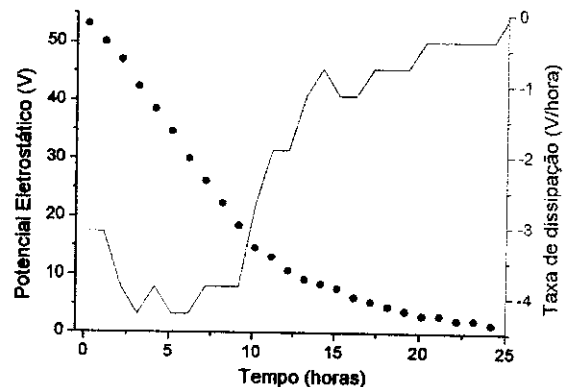


Figura G5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

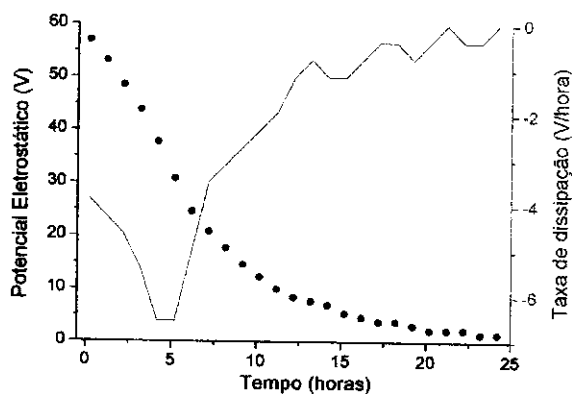


Figura G6: Curva de decaimento e derivada da região V.

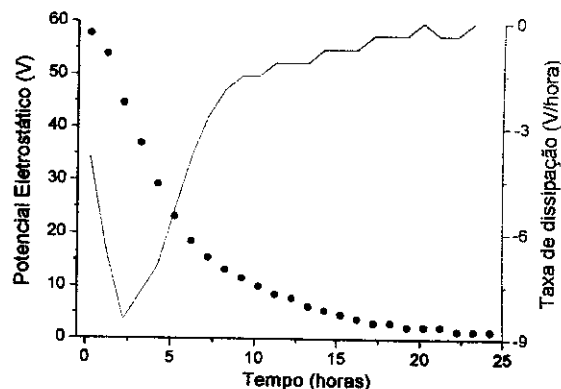


Figura G7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

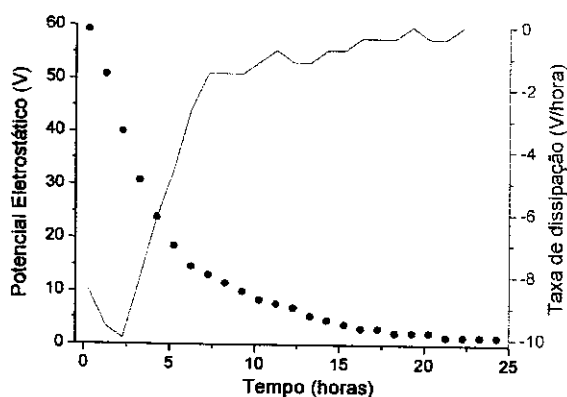


Figura G8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

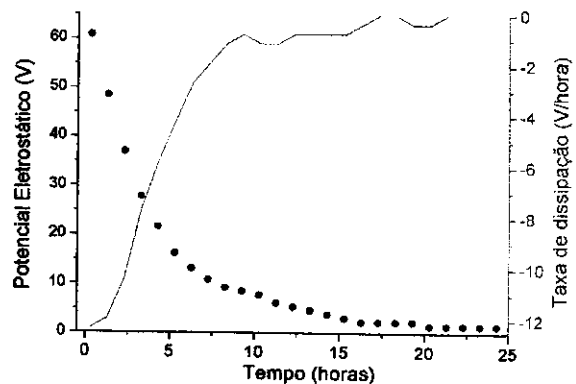


Figura G9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

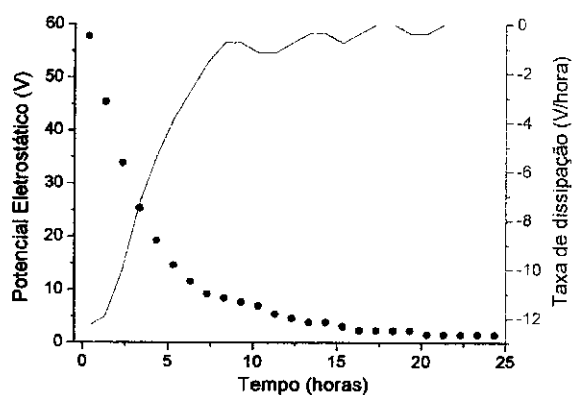


Figura G10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

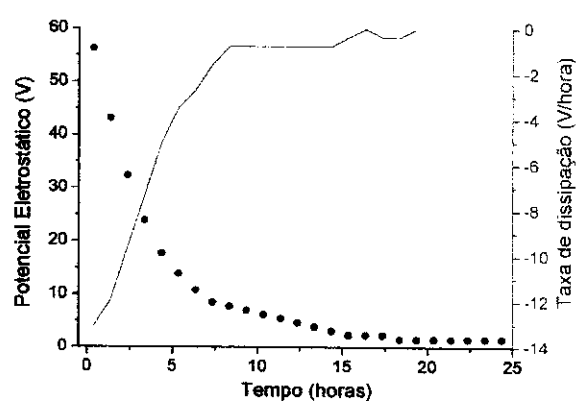


Figura G11: Curva de decaimento e derivada da região X.

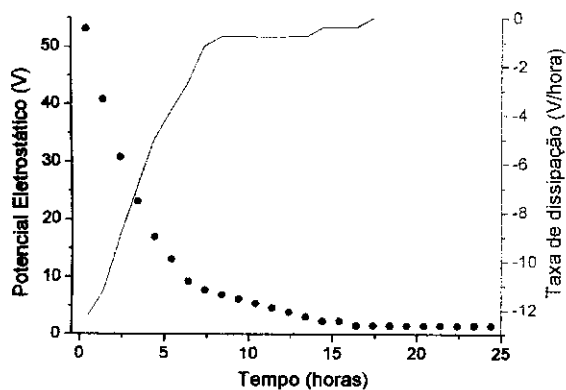


Figura G12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

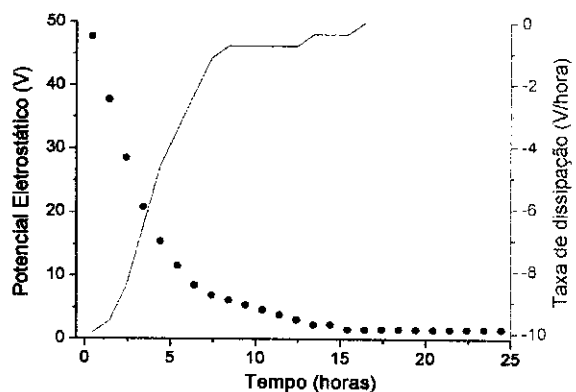


Figura G13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

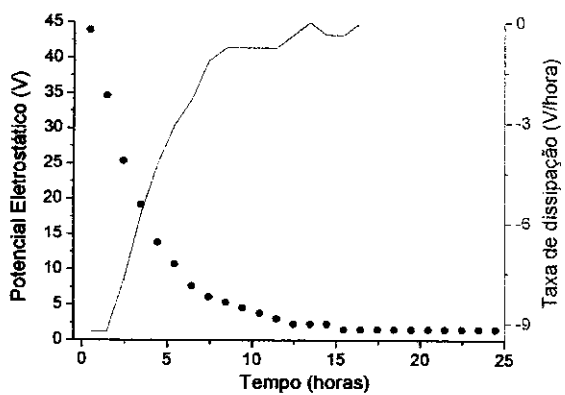


Figura G14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

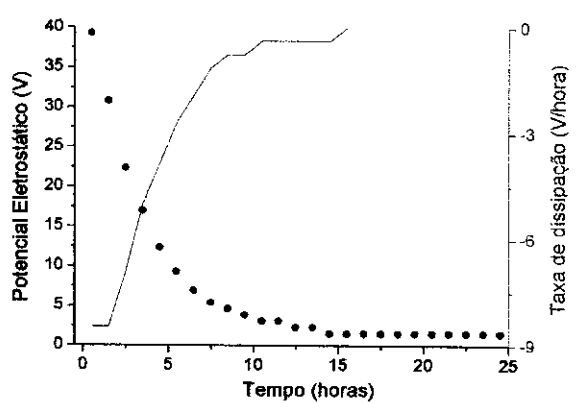


Figura G15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.

Apêndice H

Mapa inicial de distribuição de potenciais, curvas de decaimento e respectivas derivadas obtidos em um experimento realizado com a amostra II cuja curva de decaimento geral é mostrada na figura 4.31c. Foi aplicada 1 descarga negativa com o dispositivo antiestático, a 17 cm de altura sobre o centro da amostra.

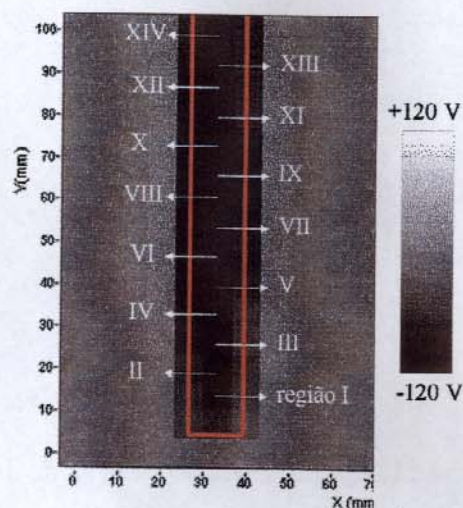


Figura H1: Mapa de distribuição de potenciais inicial. A amostra está marcada em vermelho.

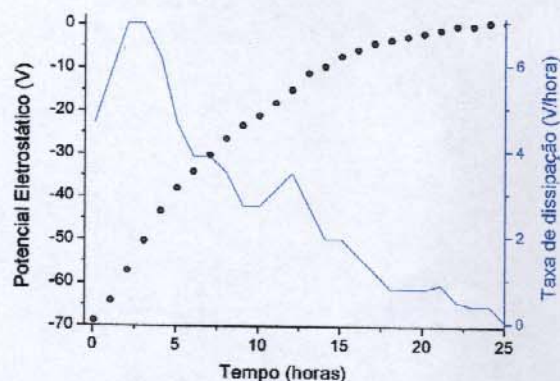


Figura H2: Curva de decaimento e derivada da região I.

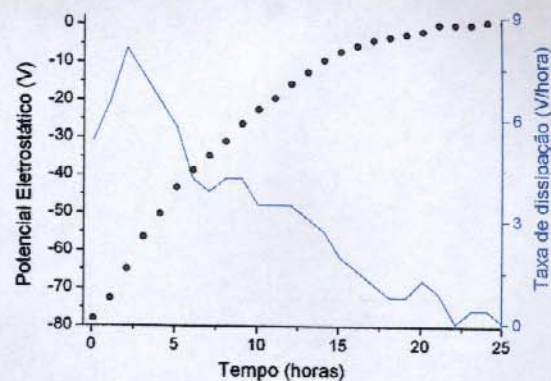


Figura H3: Curva de decaimento e derivada da região II.

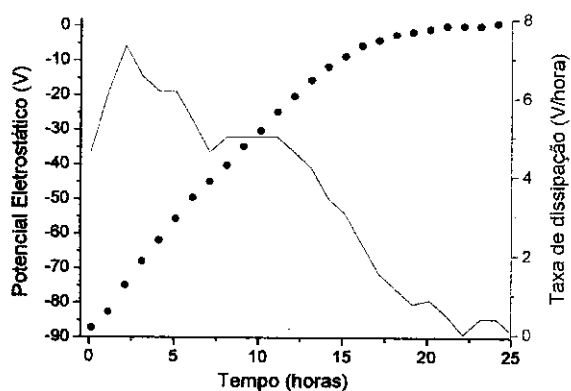


Figura H4: Curva de decaimento e derivada da região III.

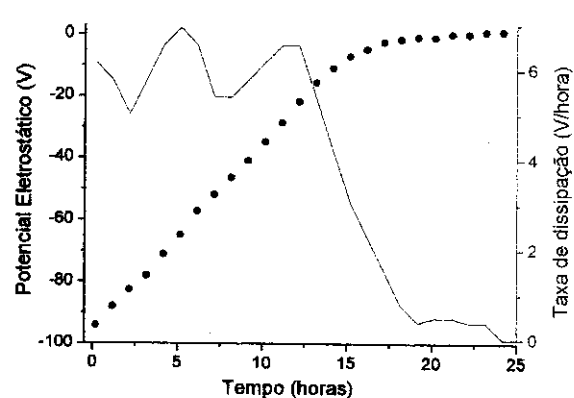


Figura H5: Curva de decaimento e derivada da região IV.

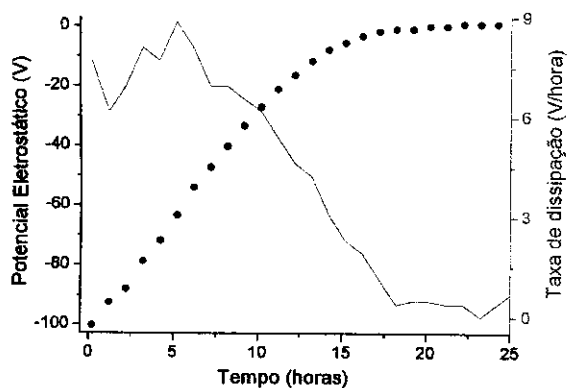


Figura H6: Curva de decaimento e derivada da região V.

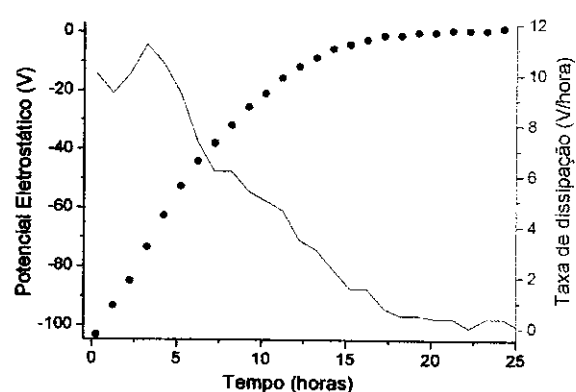


Figura H7: Curva de decaimento e derivada da região VI.

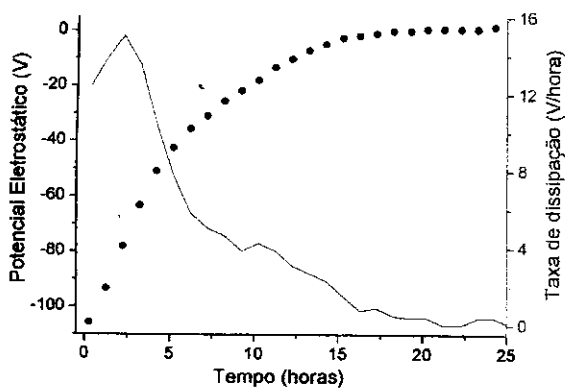


Figura H8: Curva de decaimento e derivada da região VII.

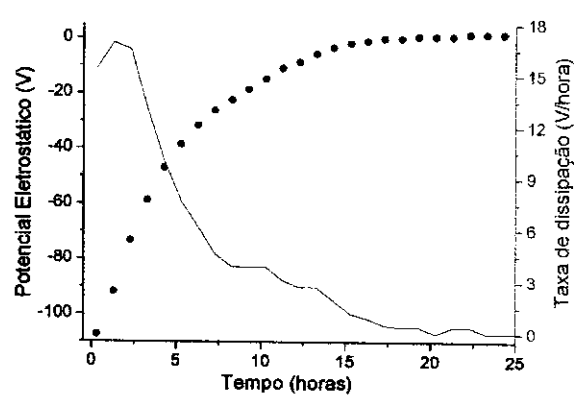


Figura H9: Curva de decaimento e derivada da região VIII.

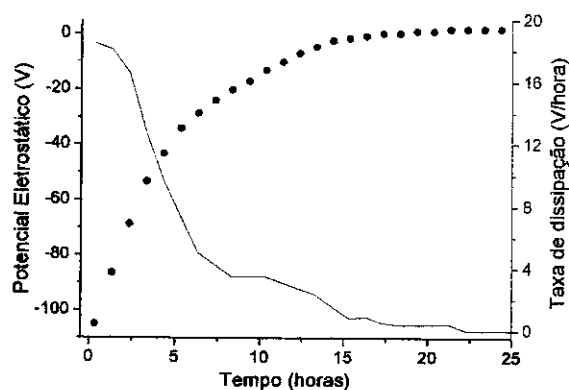


Figura H10: Curva de decaimento e derivada da região IX.

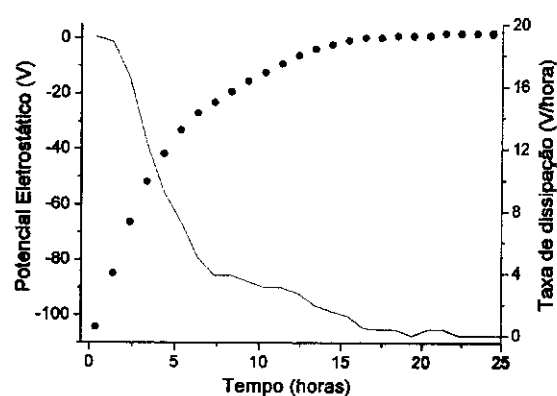


Figura H11: Curva de decaimento e derivada da região X.

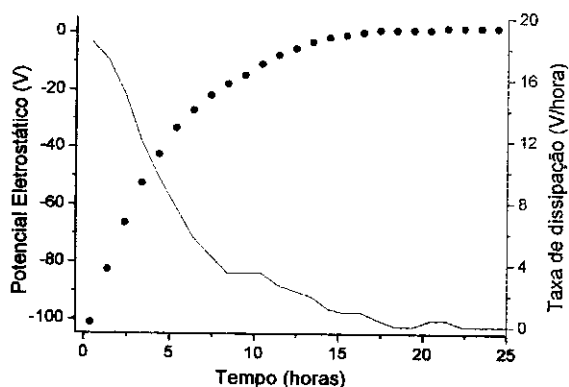


Figura H12: Curva de decaimento e derivada da região XI.

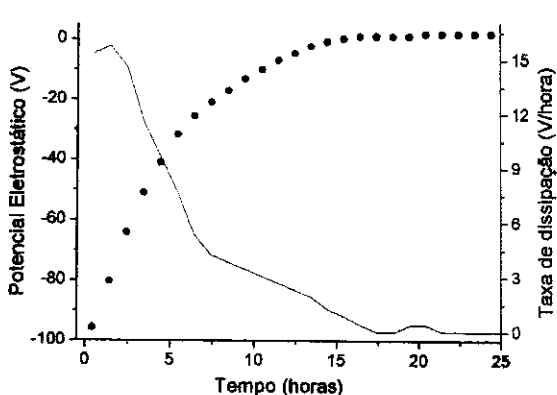


Figura H13: Curva de decaimento e derivada da região XII.

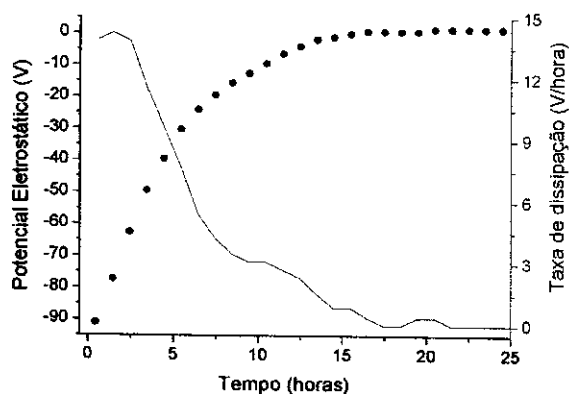


Figura H14: Curva de decaimento e derivada da região XIII.

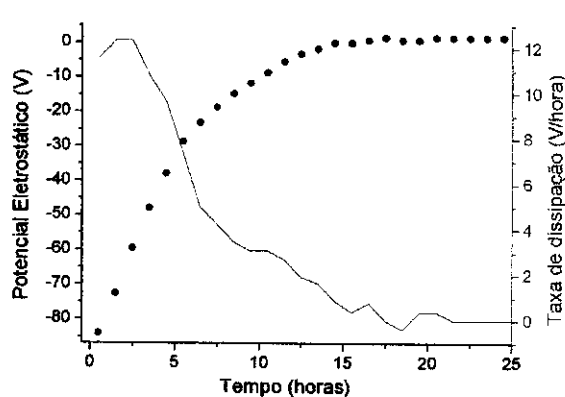


Figura H15: Curva de decaimento e derivada da região XIV.