



M499p Meira, Ubirajara Rocha.
Pulso de ruptura em campo não-uniforme no alto vácuo /
Ubirajara Rocha Meira. - Campina Grande, 1979.
117 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade
Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1979.
"Orientação : Prof. K. D. Srivastava".
Referências.

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Ruptura do Vácuo.
3. Vácuo - Descargas. 4. Dissertação - Ciências. I.
Srivastava, K. D. II. Universidade Federal da Paraíba -
Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.311(043)

AGRADECIMENTOS

Sinto-me na obrigação de registrar os meus agradecimentos a todos os colegas, funcionários e professores do Departamento de Engenharia Elétrica que, direta ou indiretamente, concorreram para efetivação deste trabalho.

À meus pais, também cooperadores deste êxito, o meu mais profundo reconhecimento.

À minha noiva, pelo seu estímulo, a minha gratidão.

Finalmente, o reconhecimento especial ao meu orientador K. D. Srivastava.

RESUMO

Com a aplicação de equipamentos à vácuo em sistemas de potência, urge a necessidade do estudo das características de ruptura em "gaps" no vácuo, com surtos de tensão.

Este trabalho verifica, praticamente, a influência da curvatura dos eletrodos através dos parâmetros, campo elétrico e área. Utilizando-se da configuração hemisfério-plano, com impulsos atmosféricos e surtos de manobra em alto vácuo, os resultados experimentais indicam que o campo elétrico e a área efetiva do catodo têm importante função na ruptura, para pequenas distâncias. Para grandes distâncias, o fenômeno é muito mais complexo e o processo de ruptura se mostra bastante irregular.

ABSTRACT

Application of vacuum apparatus in power systems necessitates the study of breakdown characteristics of vacuum gaps under surge voltages. This thesis deals with the influence of electrode curvature on the breakdown voltage of sphere-to-plane gaps under lightning and switching surge voltages. Experimental results indicate that for small gaps (< 2 mm) the electric field at the cathode and the "effective" area of the cathode play a crucial role. For larger gaps the phenomena are much more complex and the breakdown process is highly erratic.

Í N D I C E

<u>CAPÍTULO</u>		<u>PÁGINA</u>
I	INTRODUÇÃO	1
II	TEORIA DA RUPTURA NO VÁCUO	3
	2.1 - FENÔMENO DE PRÉ-RUPTURA	3
	2.1.1 - Corrente de Pré-Ruptura Permanente	4
	2.1.1(a) - Emissão Termiônica	5
	2.1.1(b) - Emissão Schottky	5
	2.1.1(c) - Emissão de Campo	6
	2.1.2 - Micro-Descargas	9
	2.2 - HIPÓTESES DE RUPTURA NO VÁCUO	10
	2.1.1 - Hipótese do Feixe de Elétrons	10

CAPÍTULOPÁGINA

2.2.1(a) - Hipótese do Aquecimento do Catodo	10
2.2.1(b) - Hipótese do Aquecimento do Anodo	11
2.2.2 - Hipótese da Troca de Partículas	13
2.2.2(a) - Hipótese do Íon Positivo	13
2.2.2(b) - Hipótese do Íon Positivo - Íon Negativo	14
2.2.3 - Hipótese do Impacto de Partículas	14
2.3 - PREDOMINÂNCIA DAS HIPÓTESES	15
III ARRANJO EXPERIMENTAL	23
3.1 - SISTEMA DE ALTO VÁCUO	23
3.2 - ELETRODOS	25
3.2.1 - Instalação e Ajuste dos Eletrodos	25
3.2.2 - Forma e Superfície dos Eletrodos	26
3.3 - DISPOSIÇÃO ELÉTRICA	26

<u>CAPÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
3.4 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	27
IV EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS	34
4.1 - EXPERIÊNCIAS	34
4.1.1 - Primeira Série	34
4.1.2 - Segunda Série	35
4.1.3 - Terceira Série	35
4.1.4 - Quarta Série	36
4.2 - PROCEDIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS	36
4.3 - RESULTADOS	38
4.3.1 - Apresentação dos Resultados - Pri meira Série	38
4.3.2 - Apresentação dos Resultados - Se gunda Série	39
4.3.3 - Apresentação dos Resultados - Ter ceira Série	39

CAPÍTULOPÁGINA

	4.3.4 - Apresentação dos Resultados - Quarta Série	41
V	OBSERVAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	88
	5.1 - OBSERVAÇÕES	88
	5.2 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
VI	CONCLUSÕES	110
	REFERÊNCIAS	112

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	Diagrama de energia dos elétrons num metal	17
2.2	Diagrama de energia de um eletrodo metálico submetido a um campo elétrico	17
2.3	Campo elétrico incremental na superfície de um eletrodo metálico	18
2.4	Micro-descarga típica	18
2.5	Ruptura produzida pelo aquecimento de protuberâncias no catodo	19
2.6	Ruptura produzida pelo feixe de elétrons quando da incidência no anodo	19

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.7	Ruptura produzida pelo processo da troca de partículas - íon positivo	20
2.8	Ruptura produzida por micro-partículas	20
2.9	(a) Micro-partículas liberada do catodo e se movendo para o anodo	21
	(b) Nuvem decorrente do material vaporizado pelo impacto das micro-partículas no anodo	21
2.10	Variação da tensão média de ruptura V_r versus distância entre os eletrodos d	22
3.1	Diagrama esquemático do sistema de vácuo	30
3.2	Curvas de evacuação	31
3.3	Superfície de um eletrodo de bronze antes dos testes	32
3.4	Circuito equivalente do gerador de impulso	33

FIGURAPÁGINA

4.1	Impulso atmosférico negativo, 1,5/45 μ s	44
4.2	Surto de manobra negativo, 60/2000 μ s	45
4.3-4.4	Tensão máxima de ruptura contínua positiva -negativa	46-47
4.5-4.6	Tensão máxima de ruptura para impulsos at mosféricos positivos - negativos. Condiçio nados com ambas as polaridades	48-49
4.7-4.10	Faixa de variação da tensão de ruptura pa ra impulsos atmosféricos positivos - ele trodos de bronze	50-53
4.11-4.15	Faixa de variação da tensão de ruptura pa ra impulsos atmosféricos negativos - ele trodos de bronze	54-58
4.16-4.19	Faixa de variação da tensão de ruptura pa ra impulsos atmosféricos positivos - ele trodos de alumínio	59-62

FIGURAPÁGINA

4.20-4.24	Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos - eletrodos de alumínio	63-67
4.25-4.29	Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos - eletrodos de bronze	68-72
4.30-4.34	Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos - eletrodos de bronze	73-77
4.35-4.39	Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos - eletrodos de alumínio	78-82
4.40-4.44	Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos - eletrodos de alumínio	83-87
5.1	Superfície de um eletrodo (anodo), de bronze, após os testes	94
5.2	Campo elétrico - método das imagens	95

FIGURAPÁGINA

5.3-5.6	Campo elétrico na superfície do eletrodo hemisférico	96-99
5.7-5.10	Campo elétrico na superfície do eletrodo plano	100-103
5.11-5.12	Campo máximo de ruptura para surtos de manobra positivos - negativos	104-105
5.13	Campo máximo de ruptura para impulsos atmosféricos negativos	106
5.14	Área efetiva do eletrodo plano	107
5.15	Área efetiva do eletrodo hemisférico	108
5.16	Campo máximo de ruptura, de Schmidt, tensão contínua	109

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O conceito do uso de vácuo, como isolante, é bastante antigo e decorre do fato de que, se a condução depende do fluxo de partículas carregadas - elétrons, íons positivos, então, a ausência de tais partículas, que é o vácuo absoluto, pode produzir um perfeito isolante. Entretanto, o crescente interesse nas propriedades de isolação elétrica de alto vácuo é visto pelas suas aplicações em chaves de alta potência, aceleradores de partículas, tubos de raio - X, bem como pelas exigências em aparelhos de alta tensão - geradores eletrostáticos para operar no espaço.

Apesar das várias pesquisas já efetivadas, a ruptura entre eletrodos no vácuo não se mostra ainda suficientemente esclarecida, mesmo porque a presença de diversos fatores, tais como material, área e geometria dos eletrodos, tem influenciado, sobremaneira, a tensão de ruptura. Rabinowitz (21) e Miller (19) relataram resultados de tensões contínuas de ruptura com

distâncias entre os eletrodos de até 1 mm. Recentemente, Nandago pal (20) e Schmidt (22) apresentaram estudos sobre ruptura com impulsos atmosféricos e tensões à frequência industrial, 60 Hz, para configuração ponta-plano e distâncias até 20 mm. Este trabalho se propõe a verificar, praticamente, a influência da curvatura dos eletrodos - configuração hemisfério-plano - em alto vácuo, através da análise de dois parâmetros críticos, campo elétrico e área. Tenta-se, também, sugerir a predominância de um mecanismo de ruptura para pequenas distâncias entre os eletrodos, quando submetidos a impulsos atmosféricos e surtos de manobra.

Os fenômenos de pré-ruptura e as várias hipóteses, sugeridas para justificar os efeitos de ruptura no vácuo, com as suas respectivas predominâncias, são apresentados no Capítulo II. Encontram-se descritos no Capítulo III o sistema de vácuo com todos os equipamentos mostrados no circuito e os preparativos a que foram submetidos os eletrodos, antes dos testes. No Capítulo IV, apresentamos os resultados dos testes preliminares, com tensão contínua, e dos principais, com impulso atmosférico e surto de manobra. Os fatos observados no transcorrer das experiências estão abordados no Capítulo V, assim como uma abrangente discussão dos resultados obtidos. As conclusões e algumas sugestões são apresentadas no Capítulo VI.

CAPÍTULO II

TEORIA DA RUPTURA NO VÁCUO

Para um melhor entendimento dos fenômenos de ruptura em sistemas a vácuo, torna-se necessário o conhecimento da sequência dos eventos que levam à total ruptura, denominada pré-ruptura.

2.1 - FENÔMENO DE PRÉ-RUPTURA

Caracterizado pelo fluxo de corrente de condução, mensurável - corrente de pré-ruptura - entre os eletrodos, o fenômeno de ruptura se apresenta como função da tensão e distância. Quando se eleva a tensão através dos eletrodos, para pequenas distâncias, corrente permanente começa a fluir. Com o aumento da distância entre os eletrodos, pequenos pulsos de carga se fazem presentes. Tais pulsos, chamados de micro-descargas, têm magnitude da ordem de microcoulombs e duração de milisegundos. No en

tanto, ao se experimentar uma elevação na tensão, as micro-des-cargas se estabelecem, provocando o surgimento de corrente permanente.

2.1.1 - Corrente de Prê-Ruptura Permanente

Para pequenas distâncias entre os eletrodos, o estabelecimento da corrente permanente deve-se, principalmente, à emissão de elétrons. Os mecanismos fundamentais que provocam tal emissão em superfícies metálicas, são:

- a) Emissão Termiônica
- b) Emissão Schottky
- c) Emissão de Campo

Num metal, os elétrons giram ao redor do seu núcleo através de discretos níveis de energia. Contudo, esta energia é insuficiente para que os elétrons se libertem espontaneamente. A Fig. 2.1 mostra o diagrama de energia dos elétrons num metal, onde $X = 0$ representa a energia potencial de um elétron no estado de repouso, dentro do metal; X corresponde à energia total requerida para liberar um elétron, quando este se encontra no seu estado de repouso interno, e E , o valor máximo de energia adquirido por um elétron - nível Fermi. A diferença $(X - E)$ é referida como sendo a função de trabalho (ϕ) do metal, pois esta traduz a quantidade de energia dada ao elétron, capaz de transportar a barreira de potencial.

Os mecanismos diferenciam-se na maneira como é ganha esta energia para sua emissão:

2.1.1(a) - Emissão Termiônica

Devido à ação de altas temperaturas nos metais, alguns elétrons adquirem suficiente energia para transpor a barreira de potencial. Richardson e Dushman (08) formularam quantitativamente esta emissão através da equação:

$$J_T = K_1 S T^2 \exp\left(\frac{-\phi}{kT}\right) \quad (2.1)$$

onde

J_T = densidade de corrente

K_1 = constante de emissão termiônica

S = área de emissão

T = temperatura absoluta

ϕ = função de trabalho

k = constante de Boltzmann

2.1.1(b) - Emissão Schottky

Submetendo-se um metal a um intenso campo elétrico, além da temperatura, sua barreira de potencial sofrerá uma redução, como mostrado na Fig. 2.2. Schottky (24) expressou este fenômeno de emissão pela expressão:

$$J_S = K_1 S T^2 \exp \left(-\frac{\phi - e^{3/2} E^{1/2}}{k T} \right) \quad (2.2)$$

onde

J_S = densidade de corrente

K_1 = constante de emissão termiônica

S = área de emissão

T = temperatura absoluta

ϕ = função de trabalho

k = constante de Boltzmann

e = carga do elétron

E = campo elétrico.

2.1.1(c) - Emissão de Campo

Utilizando-se a teoria dos quanta, Fowler e Nordheim (10) mostraram que, devido às propriedades vibratórias dos elétrons, a barreira de potencial poderia ser rompida em forma de túnel, mostrada na Fig. 2.3. A magnitude da corrente de emissão de campo é dada por:

$$J_E = \left(\frac{\pi p}{\text{sen} \pi p} \right) \frac{e^3 E^2}{16 \pi^2 h \phi t^2(y)} \exp \left[\frac{-4(2m\phi^3)^{1/2} v(y)}{3 h e E} \right] \quad (2.3)$$

onde

$$p = \frac{kT}{d'}$$

k = constante de Boltzmann

T = temperatura absoluta

$$d' = \frac{h e E}{2(2m\phi)^{1/2} t(y)}$$

e = carga do elétron

m = massa do elétron

$$y = \frac{(e^3 E)^{1/2}}{\phi}$$

h = $h/2\pi$, h constante de Planck

E = campo elétrico

ϕ = função de trabalho

e $v(y)$ e $t^2(y)$ são funções de y cujos valores foram tabelados por Good e Muller (12). Devido à dependência do fator $\left(\frac{\pi p}{\text{sen}\pi p}\right)$ com a temperatura, este tende para a unidade quando ($T = 0^{\circ}\text{K}$), logo a equação reduz-se a:

$$J_E = \frac{1,541 \times 10^{-6} E^2}{\phi t^2(y)} \exp \left[\frac{-6,83 \times 10^9 \phi^{3/2}}{E} v(y) \right] \text{ A/m}^2 \quad (2.4)$$

Fazendo-se $t^2(y)$ igual a um e trocando-se $v(y)$ pela função $p(y)$, introduzida por Chatterton (05), para campos uniformes, temos:

$$J_E = 1,541 \times 10^{-6} \phi^{-1} E^2 \exp \left[-6,83 \times 10^9 \phi^{3/2} E^{-1} p(y) \right] \text{ A/m}^2 \quad (2.5)$$

onde

$$p(y) = 1 - 0,89y^2 - 0,165y$$

$$y = 3,79 \times 10^{-5} \phi^{-1} E^{1/2}$$

ϕ em eV

E em V/m.

Tendo em vista a existência de protuberâncias nos eletrodos, observada por muitos autores (02,15), o campo elétrico se intensifica neste ponto, sendo necessária a introdução do fator de intensificação de campo β , na equação:

$$J_E = 1,541 \times 10^{-6} \phi^{-1} \left(\beta \frac{V}{d} \right)^2 \exp \left[-6,83 \times 10^9 \phi^{3/2} \left(\beta \frac{V}{d} \right)^{-1} p(y) \right] \text{ A/m}^2 \quad (2.6)$$

onde

V = tensão aplicada em volts

d = distância entre os eletrodos em metros

Se as correntes de emissão são observadas experimentalmente, para vários valores de tensão, fixando-se uma distância, o gráfico $\log \frac{I}{V^2}$ versus $\frac{1}{V}$ deve ser linear cuja inclinação é dada por:

$$C_1 = \frac{-0,4343 \times 6,83 \times 10^9}{\beta} \phi^{3/2} d p(y)$$

2.1.2 - Micro-Descargas

Apresentando-se sob a forma de pulsos de carga, auto-extinguível, Fig. 2.4, fluindo entre os eletrodos, as micro-descargas têm sido atribuídas ao mecanismo de troca de íons (18). Diversas teorias foram sugeridas para justificar a geração destes íons. Mansfield (17) admitiu que os íons eram de hidrogênio e originavam-se da contaminação da superfície dos eletrodos. Arnal (01) assumiu que estes resultavam de hidrogênio absorvido pelos eletrodos e Ionov (14) sugeriu a emissão termiônica como produtor destes íons. Entretanto, a existência de contaminação, apresentada como uma camada fina de óleo sobre a superfície dos eletrodos, como agente causador de micro-descargas em sistemas com bomba, foi verificada (03).

Embora o início das micro-descargas dependa da tensão, vários fatores, por sua vez, influenciam sua tensão de início, tais como pressão, distância, material e configuração dos eletrodos. Se mantivermos constante a tensão de início das micro-descargas, estas extinguem-se com o tempo. Ao elevarmos a tensão, observamos, novamente, as micro-descargas para, em seguida, diminuir. Tal fato traduz a eliminação das camadas de gases sobre os eletrodos, pelo bombardeamento de íons, conseqüentemente a diminuição da produção de íons positivos com o tempo. Daí, a superfície do anodo ser identificada como principal responsável

pelo início das micro-descargas.

2.2 - HIPÓTESES DE RUPTURA NO VÁCUO

No intento de justificar os fenômenos de ruptura observados no vácuo, várias hipóteses têm sido apresentadas, dentre as quais três melhor se afinam na explicação da ruptura, experimentada em muitas experiências:

- a) Hipótese do Feixe de Elétrons
- b) Hipótese da Troca de Partículas
- c) Hipótese do Impacto de Partículas.

2.2.1 - Hipótese do Feixe de Elétrons

2.2.1(a) - Hipótese do Aquecimento do Catodo

Esta hipótese, proposta por Dyke e Trolan (09), sugere que a ruptura decorre do aquecimento excessivo e consequente evaporação das protuberâncias existentes no catodo, devido a emissão de campo. A Fig. 2.5 ilustra o processo.

Uma equação básica de aquecimento por condução para um tronco de cone com raio r na ponta e metade do ângulo cônico θ , é:

$$T_0 - T_1 = \left[\xi(T)/2K \right] (J r/\theta)^2 + (\pi k T_0/K) \left[\cot (\pi/p) \right] (J r/\theta) \quad (2.7)$$

onde

T_0 = temperatura da ponta

T_1 = temperatura base

$\xi(T)$ = resistividade efetiva da protuberância

K = condutividade térmica

k = constante de Boltzmann

e p tem o significado atribuído na equação (2.3).

Este processo, onde a superfície do catodo apresenta-se como fator preponderante na ruptura, é suposto ser dominante para distâncias entre os eletrodos menores do que 1 mm.

2.2.1(b) - Hipótese do Aquecimento do Anodo

Inicialmente Schmidt e Boyle (23,04) postularam uma hipótese através de um feixe de elétrons, originado de protuberância no catodo, que incide sobre o anodo, causando a formação de vapores que transitam entre os eletrodos, acarretando a ruptura, conforme mostra a Fig. 2.6.

Posteriormente, Maitland (16) desenvolveu uma equação da forma $V = Cx^\alpha$, de acordo com as experiências, dando significado físico à constante C e deduziu uma expressão para α .

Supondo que a ruptura se verifica quando o fluxo de potência, para um local bombardeado no anodo, alcança um valor crítico, E , temos:

$$V = (E/D)^{0,4} x^{0,8} \quad (2.8)$$

onde

V = tensão mínima de ruptura

$$D = B^2 \beta^2$$

$$B = 1,0 \times 10^{-9} \text{ (constante)}$$

β = constante

x = distância entre os eletrodos

$$e \quad \alpha = 0,4(2 + \phi_1/2 - \theta_1/2)/(1 - 0,2\theta_1) \quad (2.9)$$

onde

$$E = LX^{\phi_1}$$

$$E = MX^{\theta_1}$$

L = fluxo de potência crítico para a distância unitária

M = fluxo de potência crítico para o campo unitário

X = campo elétrico no anodo,

para campo elétrico uniforme.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

2.2.2 - Hipótese da Troca de Partículas

2.2.2(a) - Hipótese do Íon Positivo

Esta hipótese, postulada por van Atta, van de Graff e Barton (26) supõe que, para uma tensão crítica, um elétron, casualmente presente entre os eletrodos, será acelerado através da tensão, incidindo sobre o anodo. Na colisão, íons positivos e fótons são emitidos, os quais, ao serem impulsionados para o catodo, provocam a emissão secundária de elétrons. O processo está ilustrado na Fig. 2.7.

Se A = número médio de íons positivos produzido por um elétron;

B = número médio de elétrons secundários produzido por um íon positivo;

C = número médio de fótons produzido por um elétron;

D = número médio de elétrons secundários produzido por um fóton,

então, a ruptura resultará quando

$$(AB + CD) \geq 1$$

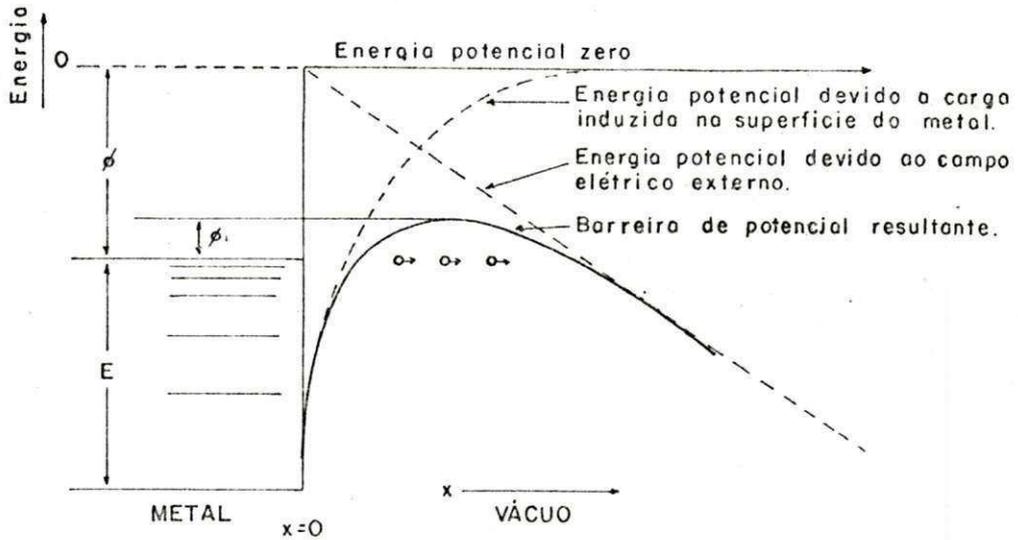


Fig. 2.3 Campo elétrico incremental na superfície de um eletrodo metálico.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321-7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

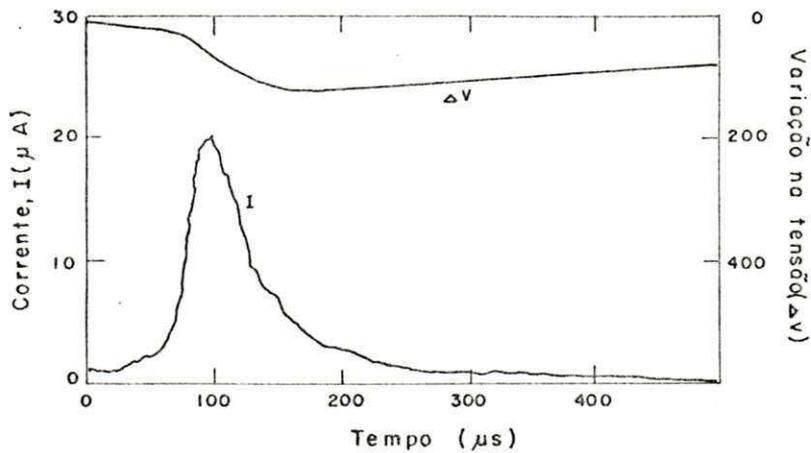


Fig. 2.4 Micro-descarga típica.

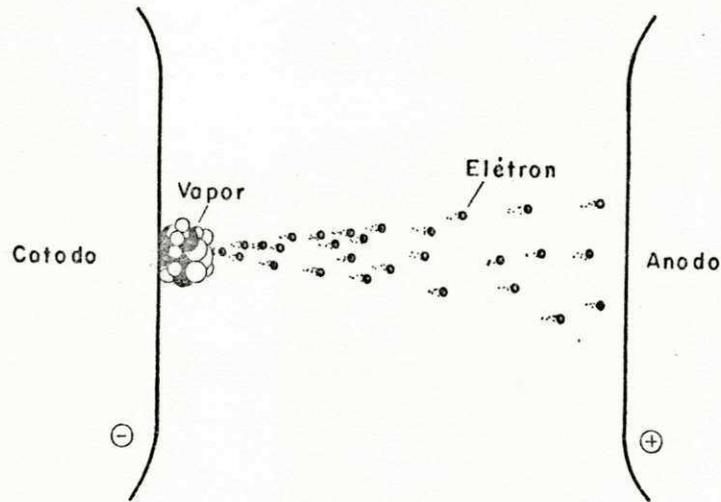


Fig. 2.5 Ruptura produzida pelo aquecimento de protuberâncias no catodo.

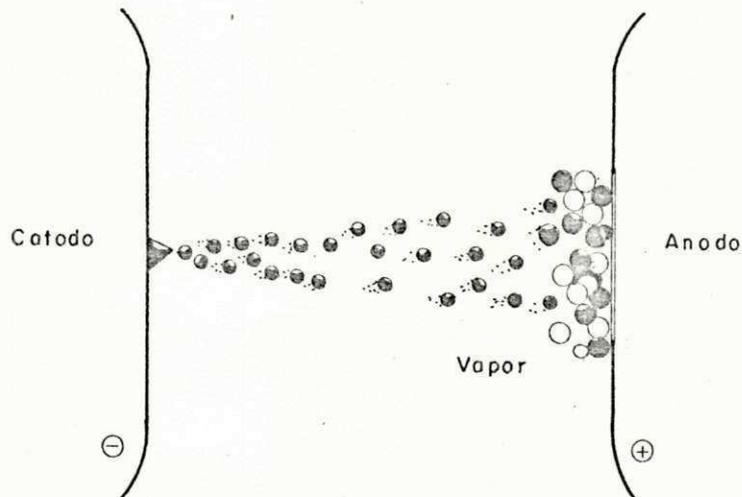


Fig. 2.6 Ruptura produzida pelo feixe de elétrons quando da incidência no anodo.

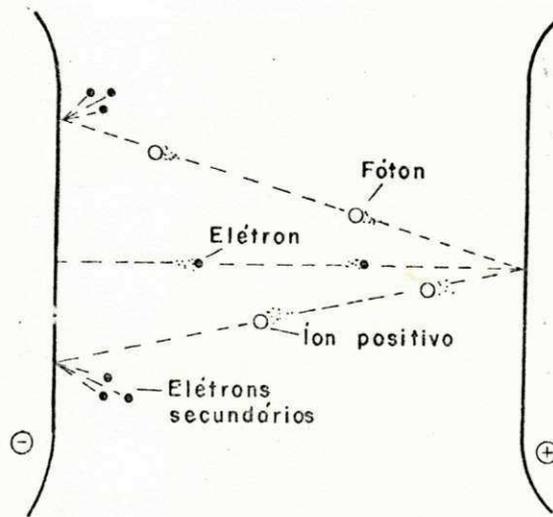


Fig. 2.7 Ruptura produzida pelo processo da troca de partículas - íon positivo.

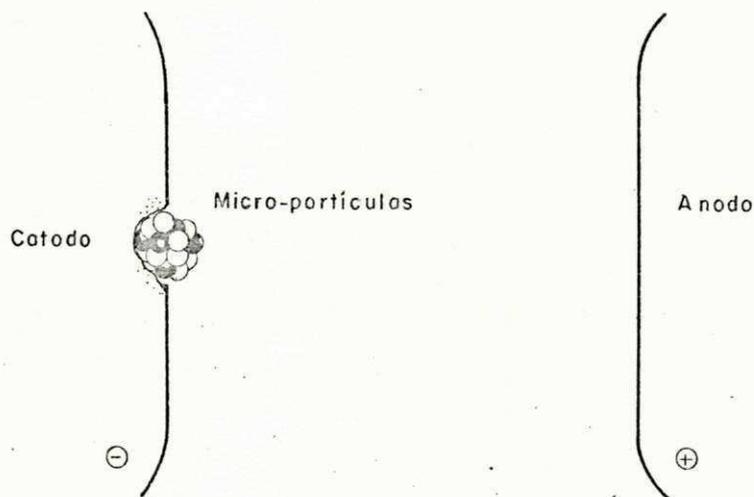


Fig. 2.8 Ruptura produzida por micro-partículas.

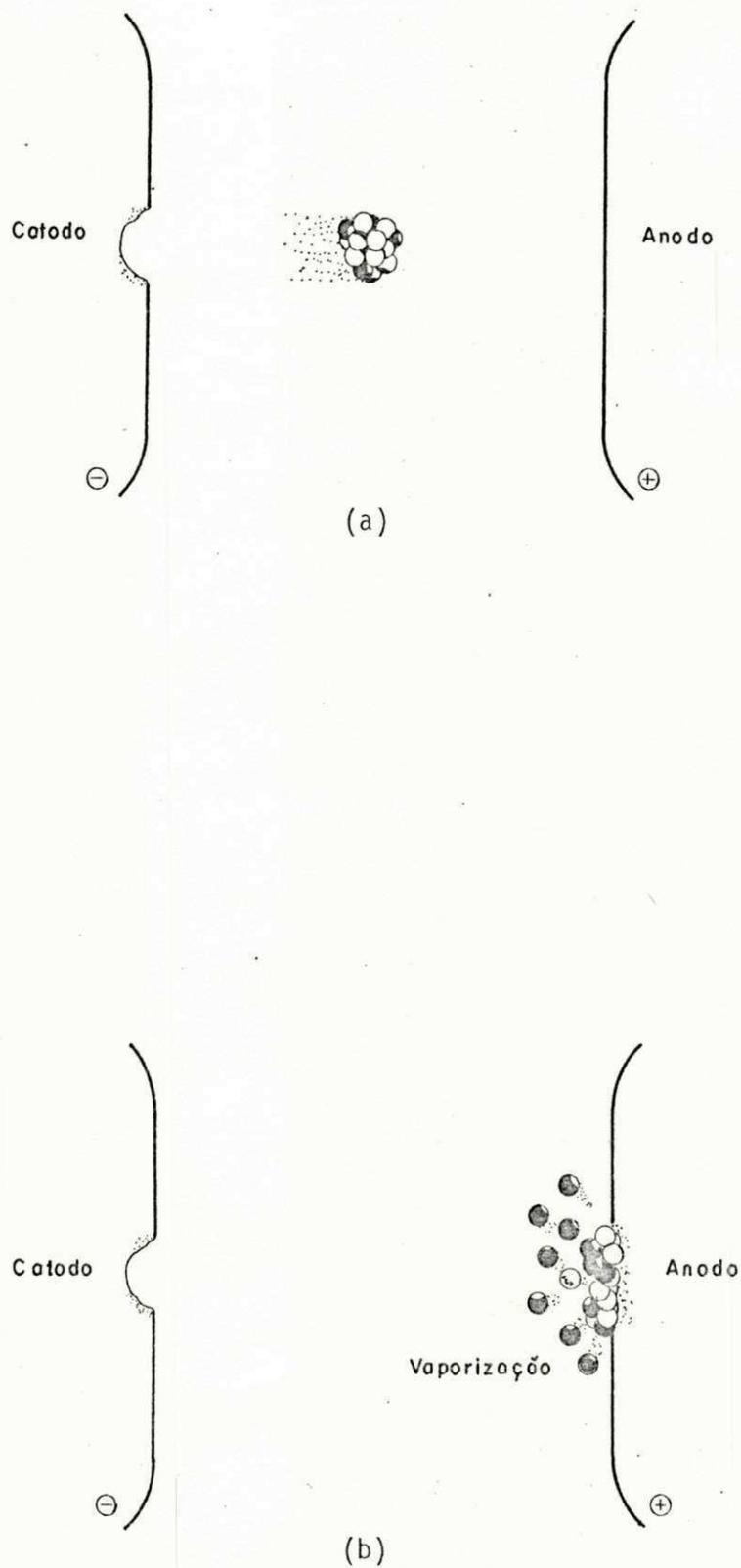


Fig. 2.9 (a) Micro-partículas liberada do catodo e se movendo para o anodo.
(b) Nuvem decorrente do material vaporizado pelo impacto das micro-partículas no anodo.

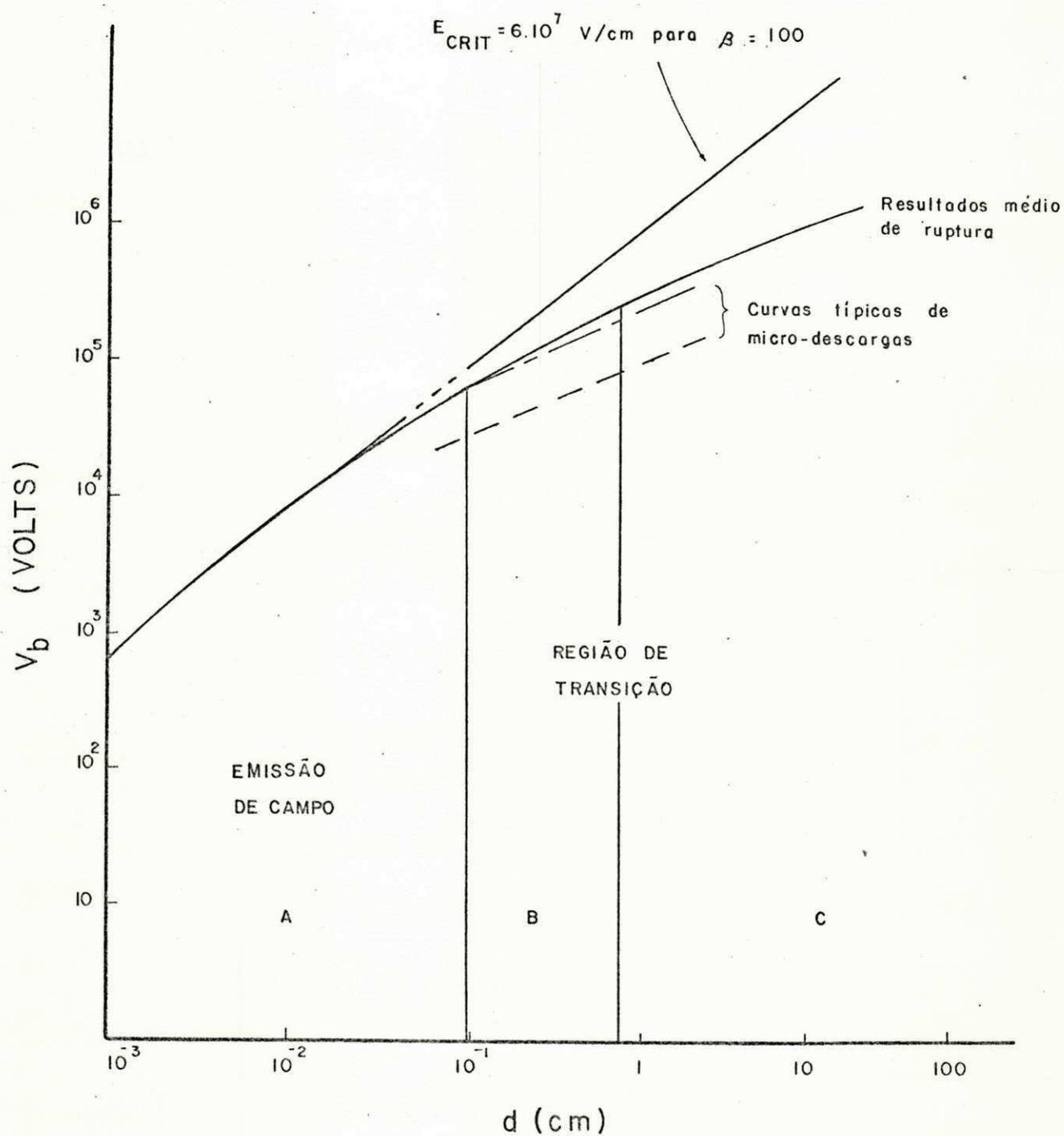


Fig. 2.10 Variação da tensão média de ruptura V_r versus distância entre os eletrodos d . Os limites das regiões A, B e C são muito variáveis.

CAPÍTULO III

ARRANJO EXPERIMENTAL

3.1 - SISTEMA DE ALTO VÁCUO

As experiências foram desenvolvidas numa câmara de vácuo, de aço inoxidável, com 1093,8 mm de altura e 509,5 mm de diâmetro, fabricada pela Edwards¹. A câmara possui três aberturas circulares, de diferentes diâmetros, que possibilitam uma visualização interna. Numa dessas aberturas, está fixada uma janela apropriada para adaptação de câmara fotográfica. Nas demais, utilizam-se janelas de acrílico, as quais permitem, externamente, a observação dos fenômenos. Suas vedações são do tipo luva com anel de borracha.

Para melhor observação dos fenômenos ocorridos internamente, obstruímos a entrada de luz para o interior da câmara,

(1) Edwards High Vacuum Limited - Inglaterra.

através de tecido de algodão, preto, e, na janela de maior diâmetro acoplamos um tubo de PVC, de cor preta, com 89,0 mm de diâmetro e 2,0 m de comprimento, no intento, também, de atenuar a incidência de raio - X sobre o observador.

No topo da câmara está localizada a bucha de alta tensão, com capacidade de até 100 kV, tensão de impulso. Um anel em ouro de 22 quilates com 0,50 mm de diâmetro foi empregado para vedá-la.

Nas conexões de alimentação também foram usadas luvas com anel de borracha para suas vedações; restando as demais, o fio de Índium com 0,76 mm de diâmetro.

Na composição do sistema de vácuo, temos uma bomba mecânica rotativa, estágio simples, ES-150, pressão nominal - 10^{-3} torr, fabricação Speedivac, e uma bomba de difusão - vapor de óleo, E04, com capacidade de 600 l/s, 10^{-10} torr, da Edwards. Estas foram interligadas à câmara através de uma válvula borboleta, na saída da bomba de difusão, e de uma válvula de passagem no ramal de saída da bomba mecânica rotativa. Seguida a esta última, na entrada da câmara, colocamos uma válvula de drenagem. Como mostra o diagrama esquemático da Fig. 3.1, o sistema de ligação enquadrou-se ao tipo "by - pass".

A medição fez-se através de medidores de pressão, colocados antes da válvula borboleta, tipo Penning 8, modelo CP 25-5, e entre a saída da bomba mecânica rotativa e a válvula de passagem, tipo Thermocouple, modelo TC - 1 - Edwards. A Fig. 3.2 mostra as curvas de evacuação para as seguintes condições iniciais:

- a) câmara de vácuo à pressão ambiente e bombas em re
pouso;
- b) câmara de vácuo à pressão ambiente, bomba mecânica
rotativa ligada e bomba de difusão recém-desligada.

3.2 - ELETRODOS

3.2.1 - Instalação e Ajuste dos Eletrodos

Fazendo-se uso de hastes, centralizou-se o par de ele
trodos à altura da janela de observação. A haste superior, de aço
inoxidável, com 12,7 mm de diâmetro, foi rosqueada no "lead" de
alta tensão e a inferior, de bronze, com 25,4 mm, acoplou-se a
um pino montado sobre um conjunto móvel com manivela, sendo pos
sível o ajustamento da distância entre os eletrodos, externamen
te. Para tal, utilizamos padrões de acrílico de diferentes es
pessuras (1,5; 3,0 e 4,8 mm) e se fez uma correlação, obtida com
paquímetro, entre as distâncias fixadas internamente e as corres
pondentes externamente. Uma vez estabelecida esta correlação, to
das as demais distâncias foram ajustadas externamente, sem a ne
cessidade de abrir a câmara. A gama de distâncias utilizadas, pas
sou a ser fixada à medida que os testes estavam sendo efetiva-
dos, levando-se em consideração o limite da bucha de alta ten
são.

3.2.2 - Forma e Superfície dos Eletrodos

Os eletrodos, feitos de alumínio e bronze, tiveram formas hemisféricas de raios 0,2; 1; 5; 15 e 19 mm, e planas, com diâmetros de 80 mm para os de bronze e 60 mm para os de alumínio (sessenta eletrodos hemisféricos e seis planos fizeram parte do material experimental). Suas superfícies, depois de visualmente polidas, assemelharam-se a de um espelho. As impurezas foram removidas, colocando-os numa solução de benzina e limpando-os; em seguida, deixamos repousar em acetona. Contudo, como pode ser notado na Fig. 3.3, as superfícies revelaram a presença de crateras, ranhuras e outras anomalias - fotografia tirada com um microscópio metalográfico - EPSTYP 2, Carlseins - Jena, objetiva - 12,5 e ocular - 10,0.

3.3 - DISPOSIÇÃO ELÉTRICA

Como parte preliminar dos testes, utilizamos uma ponte retificadora alimentada por um transformador com regulador e interligamos uma resistência de $180 \text{ M}\Omega$, composta de nove resistores unitários de $20 \text{ M}\Omega$, colocados em série dentro de um tubo de fenolite, entre a saída da fonte e o terminal de alta tensão. Nos locais onde o efeito corona se apresentava, atenuamo-la com bolas de PVC pintadas com tinta à base de alumínio. Posteriormente, usamos uma resistência d'água de valor $R_{\text{ext}} = 1,1 \text{ M}\Omega$ e passamos a alimentar através de uma fonte de alta tensão, contínua, regulada.

Nos testes principais, tal fonte foi substituída por um gerador de impulso onde as resistências de frente de onda, $R_f = 820\Omega$, e de cauda de onda, $R_c = 400\Omega$, foram utilizadas na geração dos impulsos atmosféricos e $R_f = 32.500\Omega$ e $R_c = 20.000\Omega$ na dos surtos de manobra. A Fig. 3.4 mostra o circuito equivalente do gerador de impulso. O registro fotográfico das ondas de tensão aplicadas nos experimentos foi obtido através de um osciloscópio com memória - 7613/R7613, da Tektronix.

Dispondo apenas da indicação da tensão de saída, por estágio, do gerador de impulso, através da mesa de controle, utilizamos o espinterômetro para a obtenção da tensão total de saída (dois estágios do gerador foram necessários para os testes).

3.4 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

1) Fonte de Alta Tensão Estabilizada

Modelo: 928 R

Entrada: 220 volts, 60 Hz, monofásico

Saída: 10 - 100 kV, dc

Corrente de Saída: 1mA, dc

"Ripple": 0,05% (máxima saída)

Polaridade: Reversível

Fabricante: Brandenburg - Áustria

2) Gerador de Impulso

Entrada: 220 volts, 60 Hz, monofásico

Saída: 700 kV (100 kV/estágio)

Capacitância: 0,36 μ F/estágio

Energia: 12,6 k Joules

Fabricante: Ferranti - Inglaterra

3) Transformador de Potência

Tensão Primária: 220 volts

Tensão Secundária: 120 - 60 kV

Potência: 10 - 5 kVA, monofásico

Fabricante: Ferranti - Inglaterra

4) Regulador de Tensão

Modelo: M121A12L

Entrada: 275 volts (máximo)

Saída: 0 - 275 volts

Corrente: 42 A, 48/65 Hz

Fabricante: Berco - Inglaterra

5) Divisor Capacitivo

Entrada: 770 kV

Capacitância: 400 pF

Fabricante: Ferranti - Inglaterra

6) Espinterômetro - 500 mm

Fabricante: Ferranti - Inglaterra

7) Fonte DC

Tensão de Saída: 300 kV (em vazio), não estabilizada
240 kV (com carga de 20 mA)

Fabricante: Ferranti - Inglaterra.

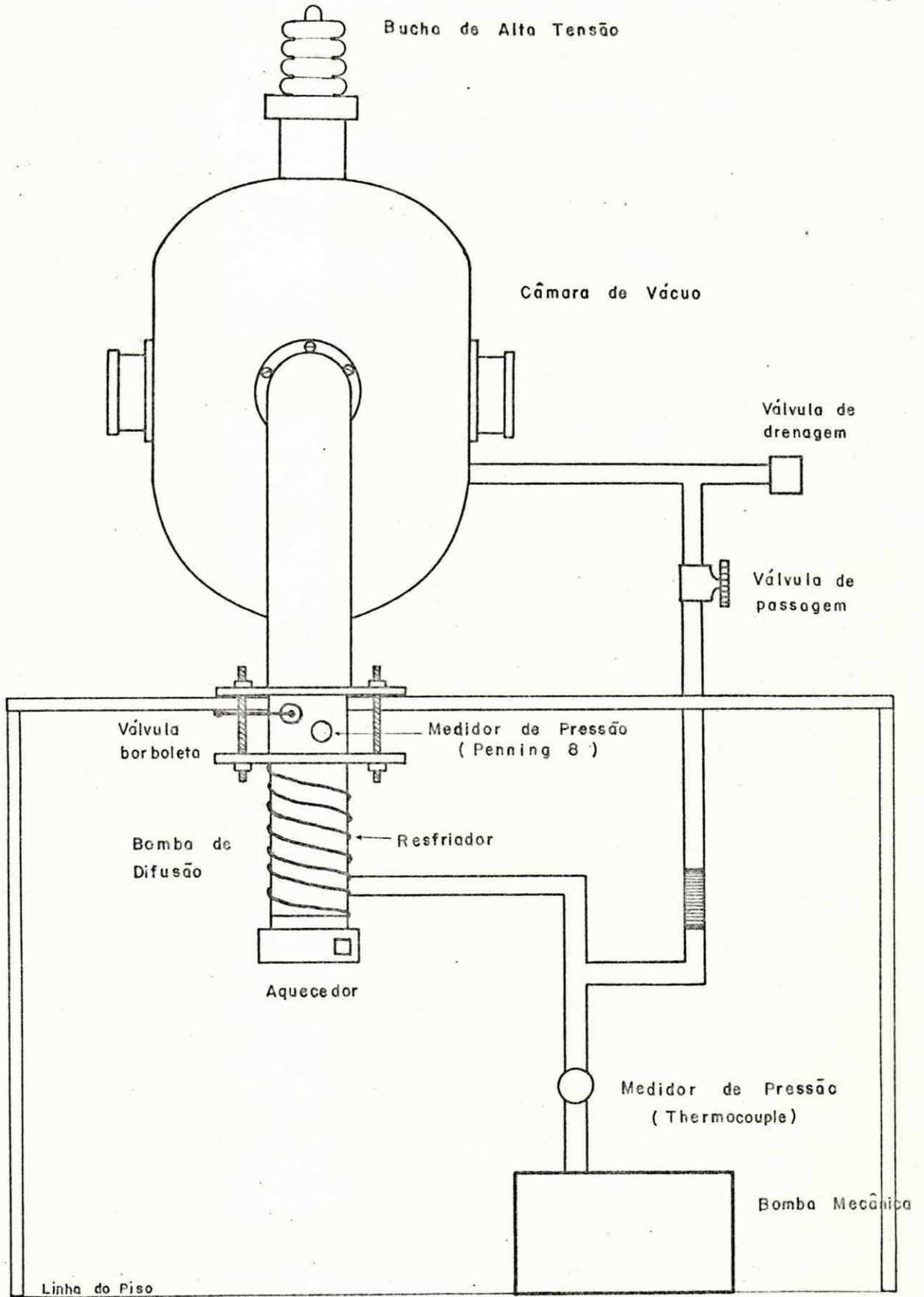


Fig. 3.1 Diagrama esquemático do sistema de vácuo.

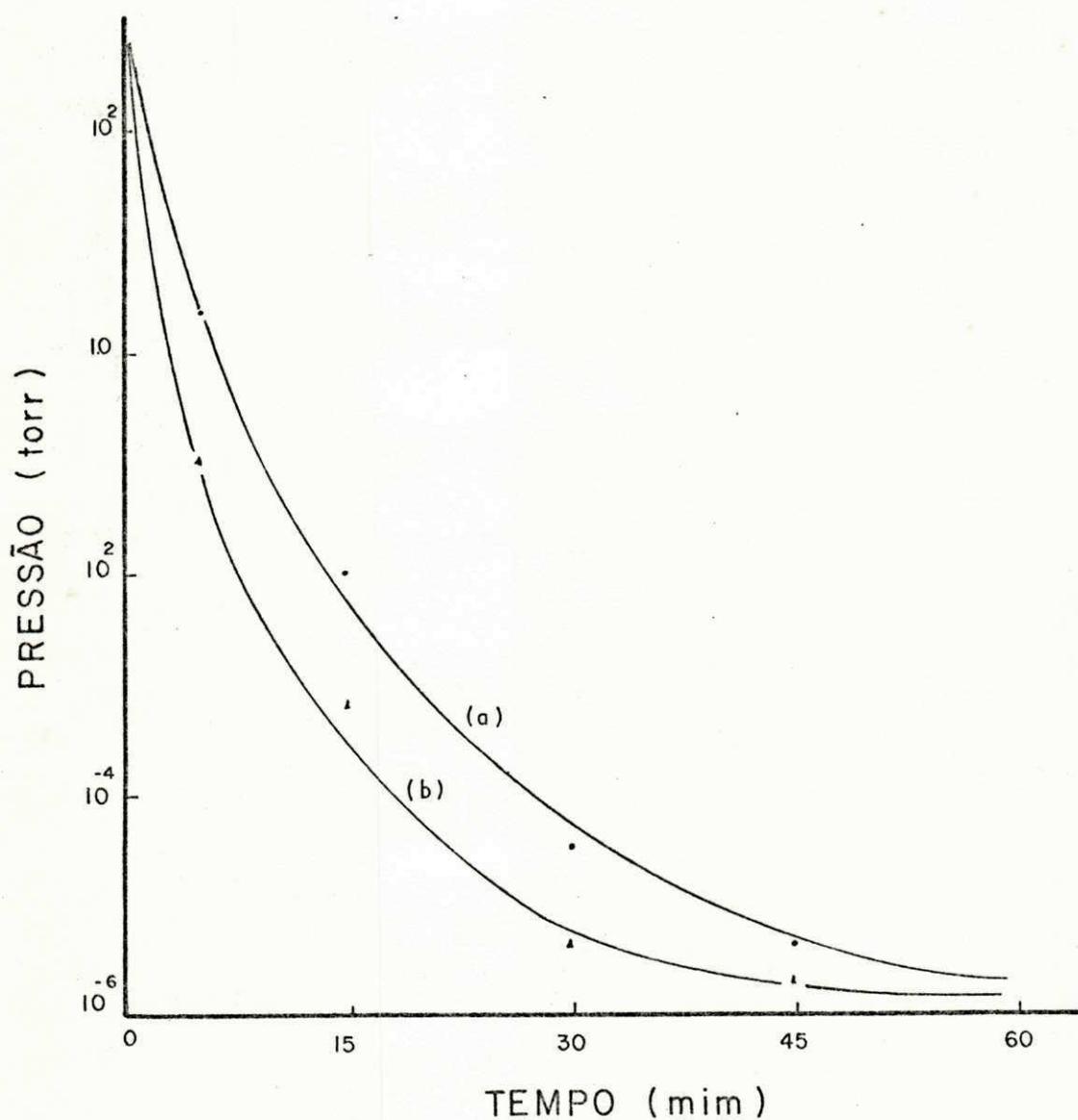


Fig. 3.2 Curvas de evacuação; (a) câmara de vácuo à pressão ambiente e bombas em repouso; (b) câmara de vácuo à pressão ambiente, bomba mecânica rotativa ligada e bomba de difusão recém-desligada.

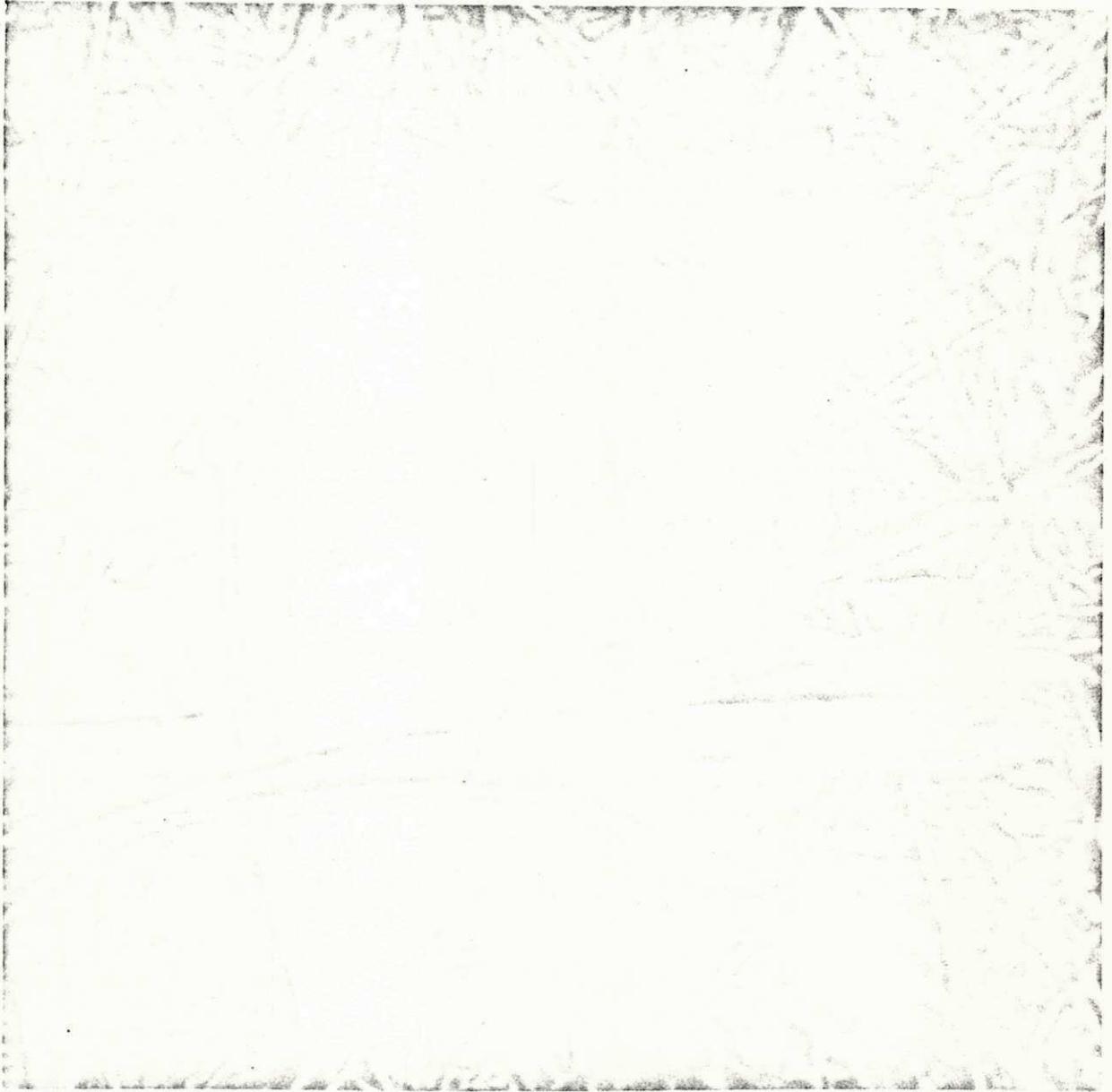


Fig. 3.3 Superfície de um eletrodo de bronze antes dos testes (objetiva - 12,5 e ocular - 10,0).

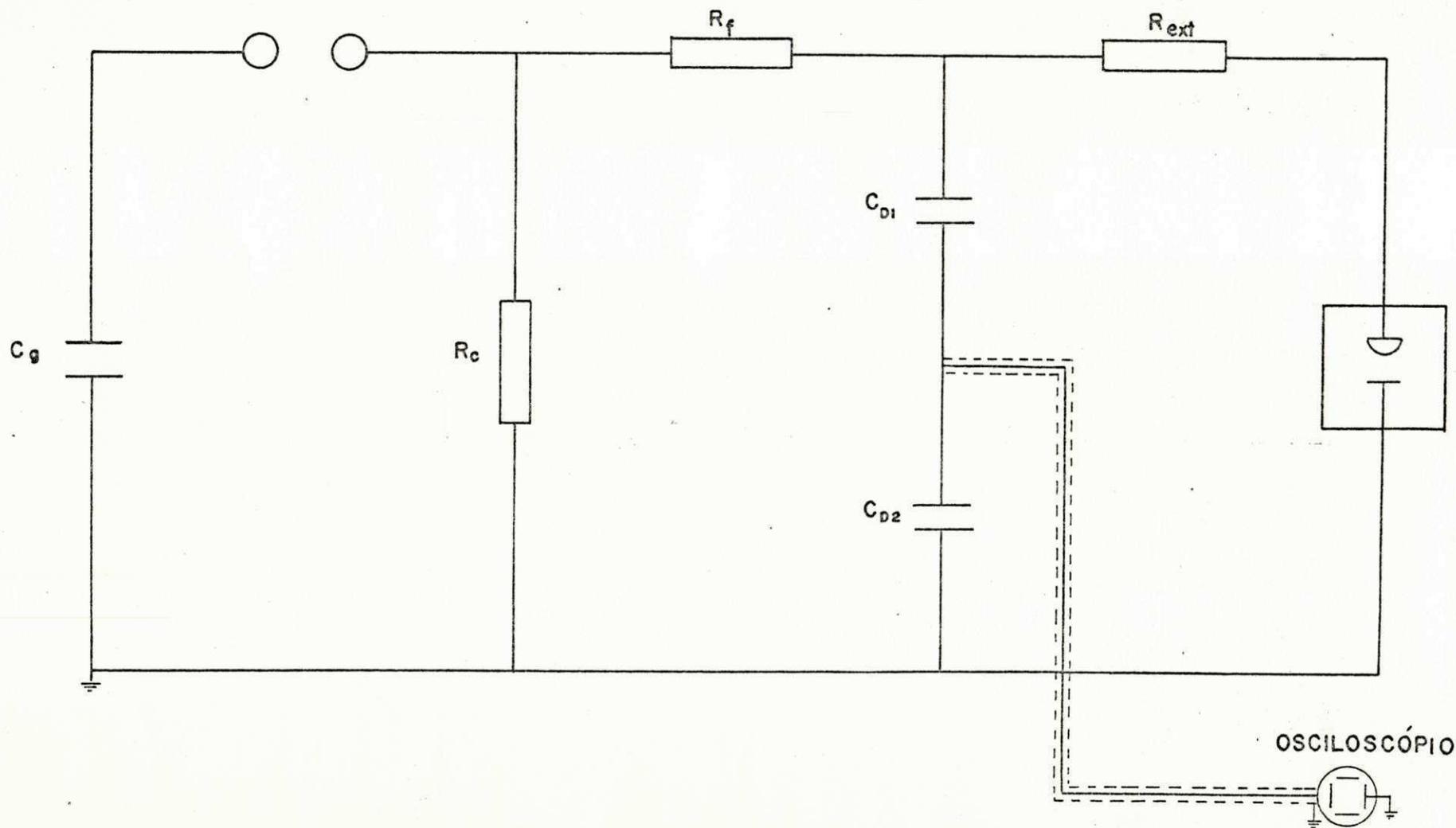


Fig. 3.4 Circuito equivalente do gerador de impulso.

CAPÍTULO IV

EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS

4.1 - EXPERIÊNCIAS

As experiências foram divididas em quatro séries, tendo como finalidade a verificação da tensão de ruptura para configuração hemisférico-plano.

4.1.1 - Primeira Série

Nesta série, foram feitas experiências preliminares, usando apenas eletrodos de bronze, hemisférico - 15 mm de raio e plano - 80 mm de diâmetro. As tensões de polaridades positiva e negativa foram supridas pela fonte DC e as tensões de ruptura foram determinadas para distâncias entre os eletrodos de 0,5 até 2,0 mm. Depois utilizamos uma fonte de tensão contínua estabilizada e, através de uma resistência d'água, aplicamos tensões de

polaridades positiva e negativa; com novos eletrodos de bronze, iguais aos acima, determinamos as tensões de ruptura para distâncias de 0,5 até 2,0 mm.

A finalidade desta primeira série de experiências foi comparar os resultados encontrados com outros já definidos.

4.1.2 - Segunda Série

Nas experiências foram usados impulsos atmosféricos, com forma de onda 1,5/45 μ s, Fig. 4.1, polaridades positiva e negativa. Para a determinação das tensões de ruptura, utilizamos eletrodos de bronze com raios de 1,5 e 19 mm - hemisféricos e 80 mm de diâmetro - plano, com distâncias entre os eletrodos de 0,25 a 2,0 mm.

Cada par de eletrodos foi submetido a tensões de polaridades positiva e negativa.

A finalidade destas experiências foi verificar o comportamento da tensão de ruptura, quando um mesmo par de eletrodos fora submetido a tensões de polaridades positiva e negativa.

4.1.3 - Terceira Série

As experiências foram feitas usando impulsos atmosféricos, com forma de onda 1,5/45 μ s, polaridades positiva e negativa. Na determinação das tensões de ruptura, usamos eletrodos de bronze e de alumínio com raios 0,2; 1; 5; 15 e 19 mm - hemisféricos e planos com 80 e 60 mm de diâmetros, respectivamente. As

distâncias entre os eletrodos variaram de 0,25 a 2,0 mm.

Cada par de eletrodos foi submetido apenas a tensões de mesma polaridade, e um novo conjunto de eletrodos foi utilizado na repetição, integral, das experiências.

Estas tiveram por finalidade investigar a influência da curvatura dos eletrodos na tensão de ruptura, para impulsos atmosféricos.

4.1.4 - Quarta Série

As experiências foram feitas usando surtos de manobra, com forma de onda 60/2000 μ s, Fig. 4.2, polaridades positiva e negativa. Na determinação das tensões de ruptura, utilizamos eletrodos de bronze e de alumínio com raios 0,2; 1; 5; 15 e 19 mm - hemisféricos e planos com 80 e 60 mm de diâmetros, respectivamente. As distâncias entre os eletrodos variaram de 0,5 a 10,0 mm.

Cada par de eletrodos foi submetido apenas a tensões de mesma polaridade.

Estas experiências tiveram por finalidade investigar a influência da curvatura dos eletrodos na tensão de ruptura, para surtos de manobra.

4.2 - PROCEDIMENTO DAS EXPERIÊNCIAS

Após colocarmos um par de eletrodos na câmara, devidamente limpo, evitando o contato nas suas superfícies, utilizamos padrões de acrílico para fazer a correlação da distância entre os

eletrodos, internamente, e a correspondente, externamente. No intento de evitar contaminações, tentou-se minimizar o tempo de abertura da janela de observação, utilizada para o acesso interno.

Através da bomba mecânica rotativa, iniciou-se o processo de evacuação da câmara, estando aberta apenas a válvula de passagem. Uma vez atingida a pressão, um valor menor do que 10^{-1} torr, medida no Thermocouple, ligamos o aquecedor da bomba de diusão e esperamos que a pressão se situasse entre 10^{-3} e 10^{-4} torr, medida no Penning 8. Fechamos a válvula de passagem e abrimos, lentamente, a válvula borboleta, evitando assim a penetração de vapores de óleo para o interior da câmara. Decorridos alguns minutos, a pressão normal de trabalho, $\leq 3 \times 10^{-6}$ torr, foi alcançada.

Colocando-se uma resistência em série com o terminal de alta tensão e fixando-se, inicialmente, a distância entre os eletrodos a um valor maior ou igual a 1,0 mm, precavendo-se assim da possibilidade de estragos nos eletrodos através de grandes descargas, aplicamos tensão de vapor reduzido para em seguida aumentá-la. A medição foi feita na mesa de controle e o registro da forma de onda foi obtido com osciloscópio de memória. Ao notar que as descargas ocorriam para valores constantes de tensão, isto é, os eletrodos estavam condicionados, prosseguimos com as experiências observando pelo tubo de PVC as descargas acompanhadas de luminosidade, até determinarmos os valores das tensões de ruptura.

Devido à presença de gases, decorrentes de sucessivas

descargas, implicando numa redução na tensão de ruptura, paramos as experiências para que se processasse o fenômeno de auto-desgasificação. Após alguns minutos, reiniciamos as experiências para que houvesse uma reconfirmação dos resultados recém-determinados.

Posicionando-se os eletrodos numa nova distância, reiniciamos as experiências. Assim procedendo, determinamos as tensões de ruptura para vários valores de distância, sendo o limite máximo da tensão aplicada imposto pela bucha de alta tensão.

A nova mudança dos eletrodos efetivou-se ao ser fechada a válvula borboleta, permanecendo a válvula de passagem também fechada e abrindo-se a válvula de drenagem, lentamente. Colocada a câmara na pressão ambiente, a sequência de troca dos eletrodos foi semelhante à descrita acima. O tempo gasto nesta troca foi suficiente para que a pressão se elevasse a 10^{-3} torr (Penning 8), possibilitando assim a abertura da válvula de passagem, lentamente, e a consequente evacuação da câmara.

4.3 - RESULTADOS

4.3.1 - Apresentação dos Resultados - Primeira Série

As observações foram feitas com eletrodos de bronze, hemisférico - 15 mm de raio e plano - 80 mm de diâmetro, a tensão contínua de polaridades positiva e negativa.

A Fig. 4.3 mostra os valores, tensão máxima de ruptura versus distância entre eletrodos, encontrados e os de Schmidt

(22), para polaridade positiva.

A Fig. 4.4 mostra os valores, tensão máxima de ruptura versus distância entre eletrodos, encontrados e os de Schmidt (22), para polaridade negativa.

4.3.2 - Apresentação dos Resultados - Segunda Série

As observações foram feitas com eletrodos de bronze, hemisféricos - 1; 5 e 19 mm de raios e plano - 80 mm de diâmetro, submetidos a impulsos atmosféricos, 1,5/45 μ s, de polaridades positiva e negativa.

A Fig. 4.5 mostra a tensão máxima de ruptura versus distância entre eletrodos, para polaridade positiva.

A Fig. 4.6 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos, para polaridade negativa.

4.3.3 - Apresentação dos Resultados - Terceira Série

As observações foram feitas com eletrodos de bronze e de alumínio, hemisféricos 0,2; 1; 5; 15 e 19 mm de raios e planos - 80 e 60 mm de diâmetro, respectivamente, submetidos a impulsos atmosféricos, 1,5/45 μ s, de polaridades positiva e negativa.

(1) Eletrodos de bronze - tensão de polaridade positiva

A Fig. 4.7 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.8 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.9 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.10 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 19 mm.

(2) Eletrodos de bronze - tensão de polaridade negativa

A Fig. 4.11 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 0,2 mm.

A Fig. 4.12 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.13 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.14 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.15 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 19 mm.

(3) Eletrodos de alumínio - tensão de polaridade positiva

A Fig. 4.16 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.17 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.18 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.19 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 19 mm.

(4) Eletrodos de alumínio - tensão de polaridade negativa

A Fig. 4.20 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 0,2 mm.

A Fig. 4.21 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.22 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.23 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.24 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 19 mm.

4.3.4 - Apresentação dos Resultados - Quarta Série

As observações foram feitas com eletrodos de bronze e de alumínio, hemisféricos - 0,2; 1; 5; 15 e 19 mm de raios e planos - 80 e 60 mm de diâmetros, respectivamente, submetidos a surtos de manobra, 60/2000 μ s, de polaridades positiva e negativa.

(1) Eletrodos de bronze - tensão de polaridade positiva

A Fig. 4.25 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 0,2 mm.

A Fig. 4.26 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.27 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.28 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.29 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 19 mm.

(2) Eletrodos de bronze - tensão de polaridade negativa

A Fig. 4.30 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 0,2 mm.

A Fig. 4.31 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.32 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.33 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.34 mostra a tensão de ruptura versus distância entre eletrodos; raio de 19 mm.

(3) Eletrodos de alumínio - tensão de polaridade positiva

A Fig. 4.35 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 0,2 mm.

A Fig. 4.36 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.37 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.38 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.39 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 19 mm.

(4) Eletrodos de alumínio - tensão de polaridade negativa

A Fig. 4.40 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 0,2 mm.

A Fig. 4.41 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 1 mm.

A Fig. 4.42 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 5 mm.

A Fig. 4.43 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 15 mm.

A Fig. 4.44 mostra a tensão de ruptura versus dis
tância entre eletrodos; raio de 19 mm.

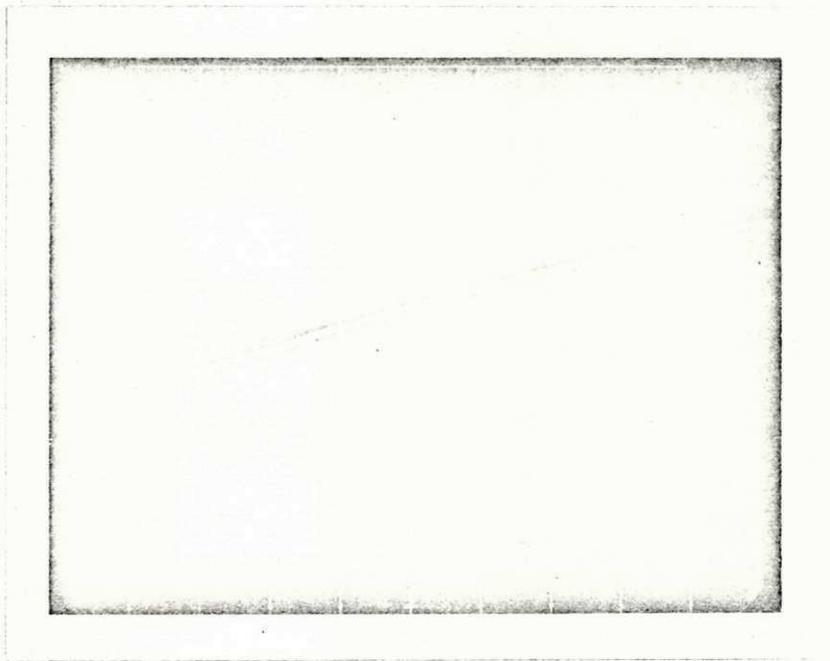


Fig. 4.1 Impulso atmosférico negativo, 1,5/45 μ s.
Escala Horizontal: 5 μ s/cm.
Escala Vertical : 0,2 V/cm.

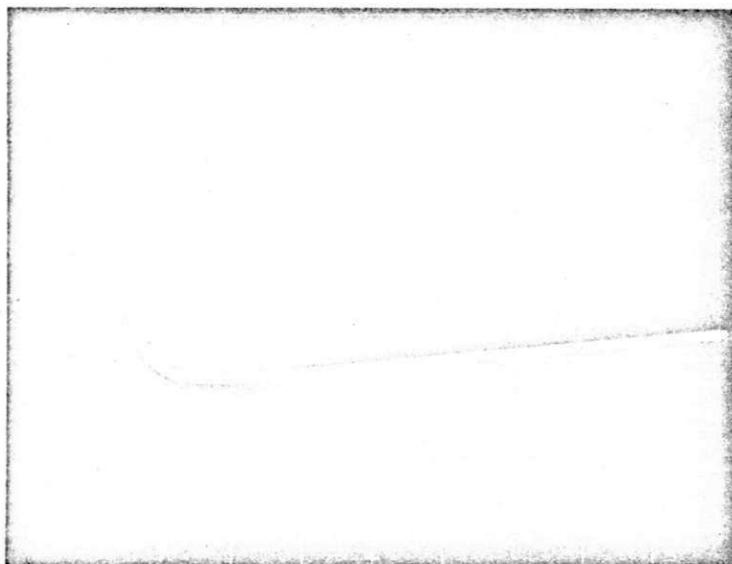


Fig. 4.2 (a) Surto de manobra negativo, 60/2000 μ s,
frente de onda.
Escala Horizontal: 50 μ s/cm.
Escala Vertical : 0,2 V/cm.



Fig. 4.2 (b) Surto de manobra negativo, 60/2000 μ s,
cauda de onda.
Escala Horizontal: 0,5 ms/cm.
Escala Vertical : 0,2 V/cm.

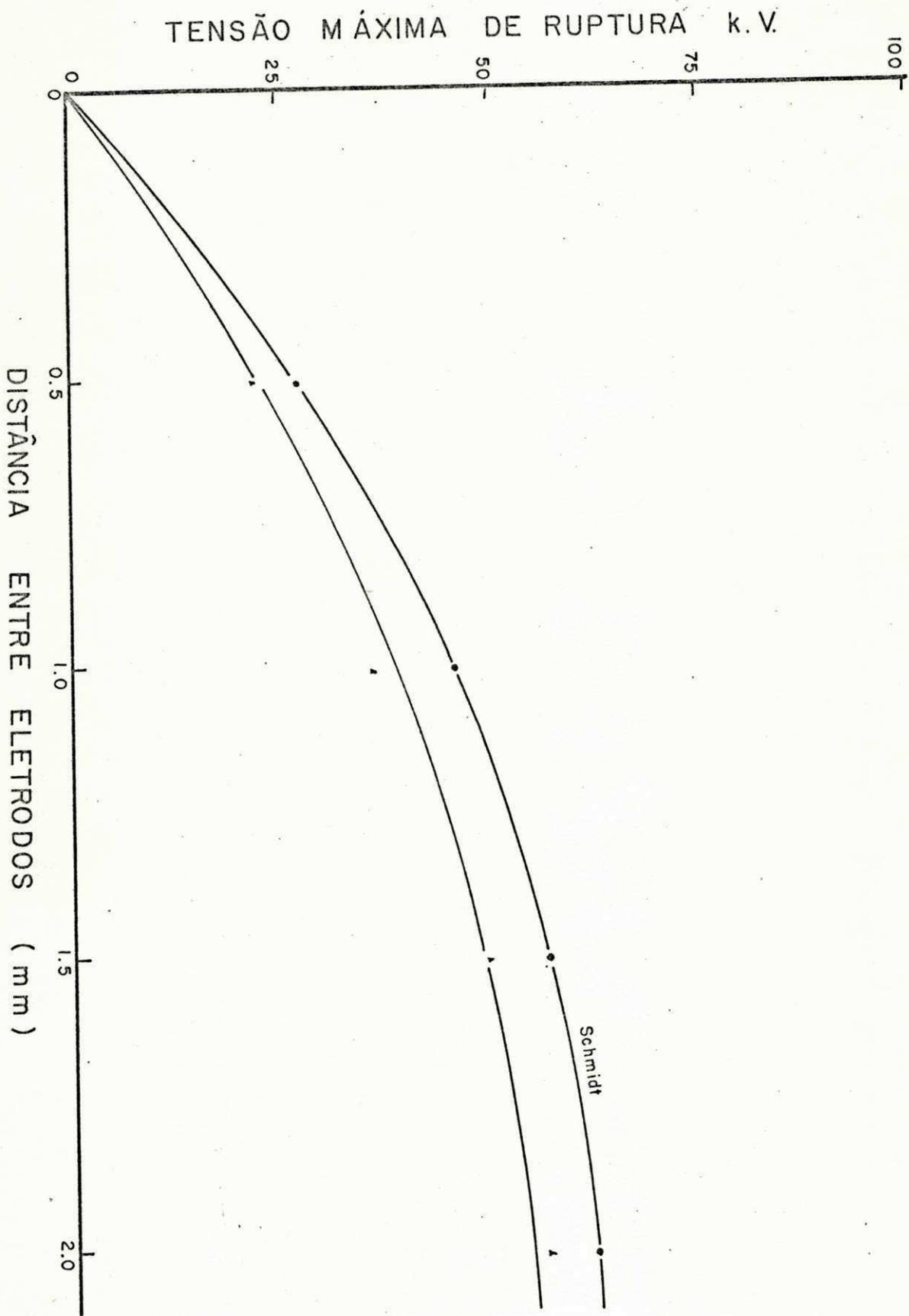


Fig. 4.3 Tensão máxima de ruptura - contínua positiva, para eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 15 mm - hemisférico.

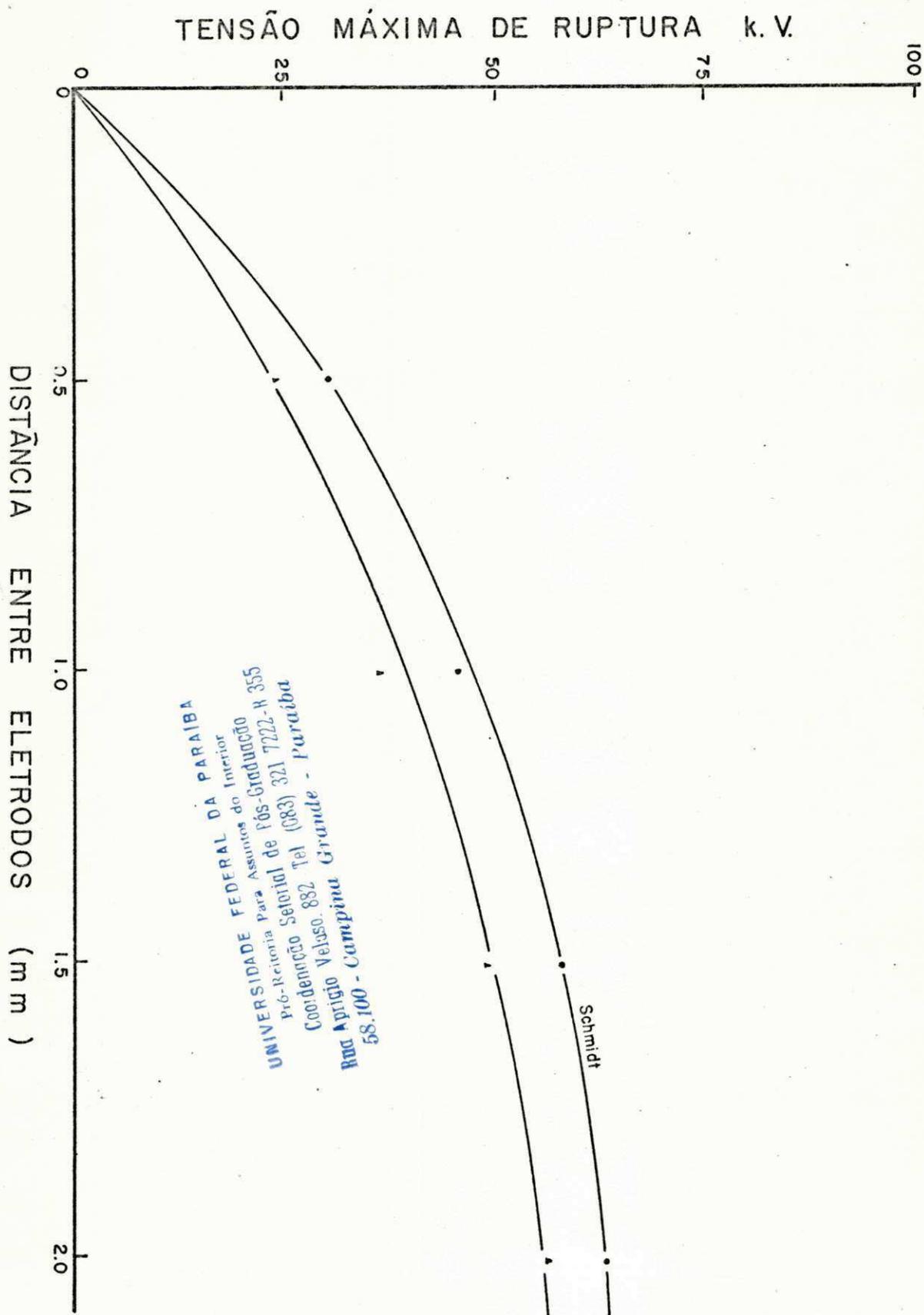


Fig. 4.4 Tensão máxima de ruptura - contínua negativa, para eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 15 mm - hemisférico.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordena o Setorial de Pós-Gradua o
 Rua Aprígio Veloso 882 Tel (083) 321 7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraiba

Schmidt

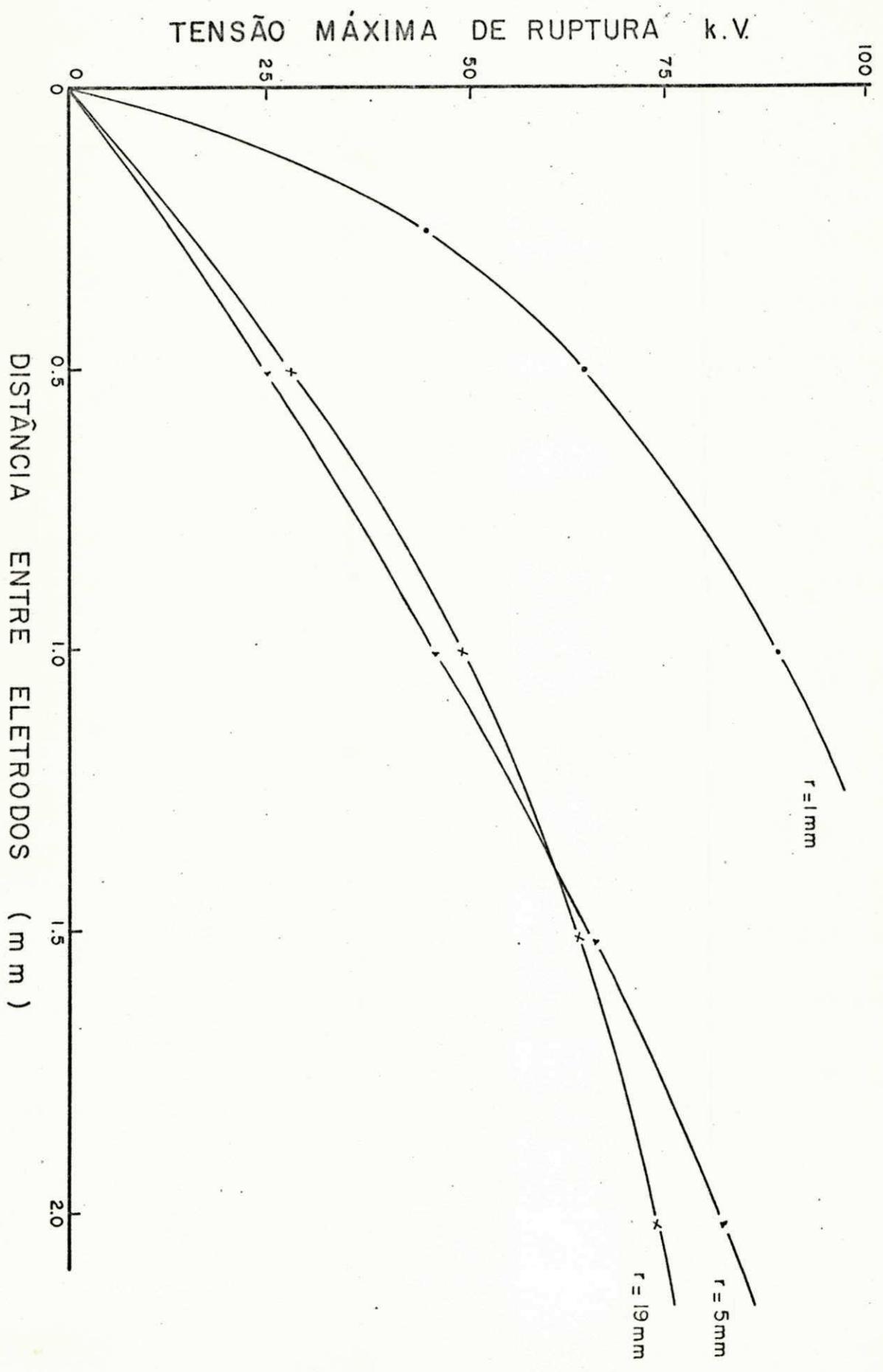


Fig. 4.5 Tensão máxima de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano. Condicionados com ambas as polaridades.

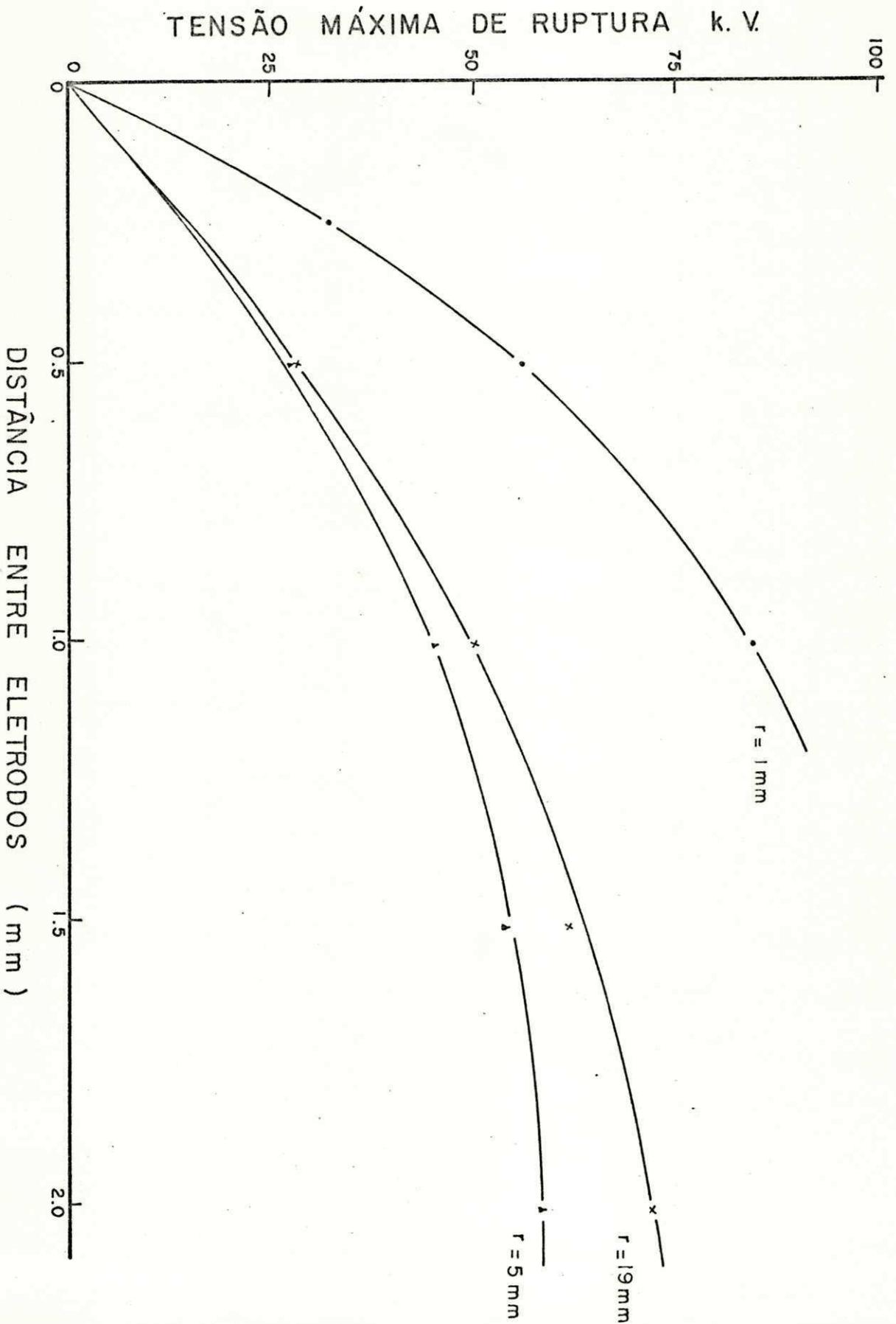


Fig. 4.6 Tensão máxima de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano. Condicionados com ambas as polaridades.

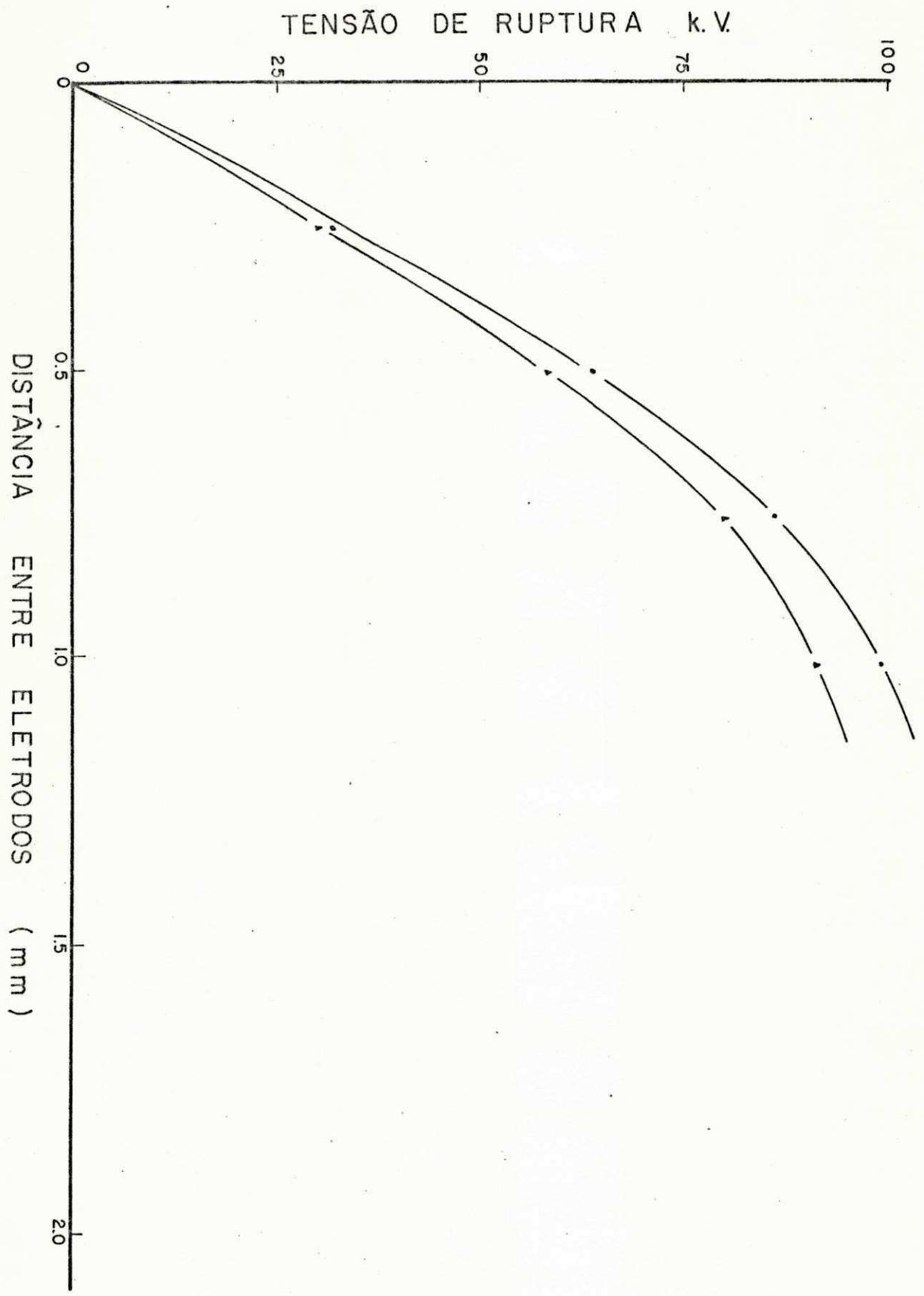


Fig. 4.7 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.

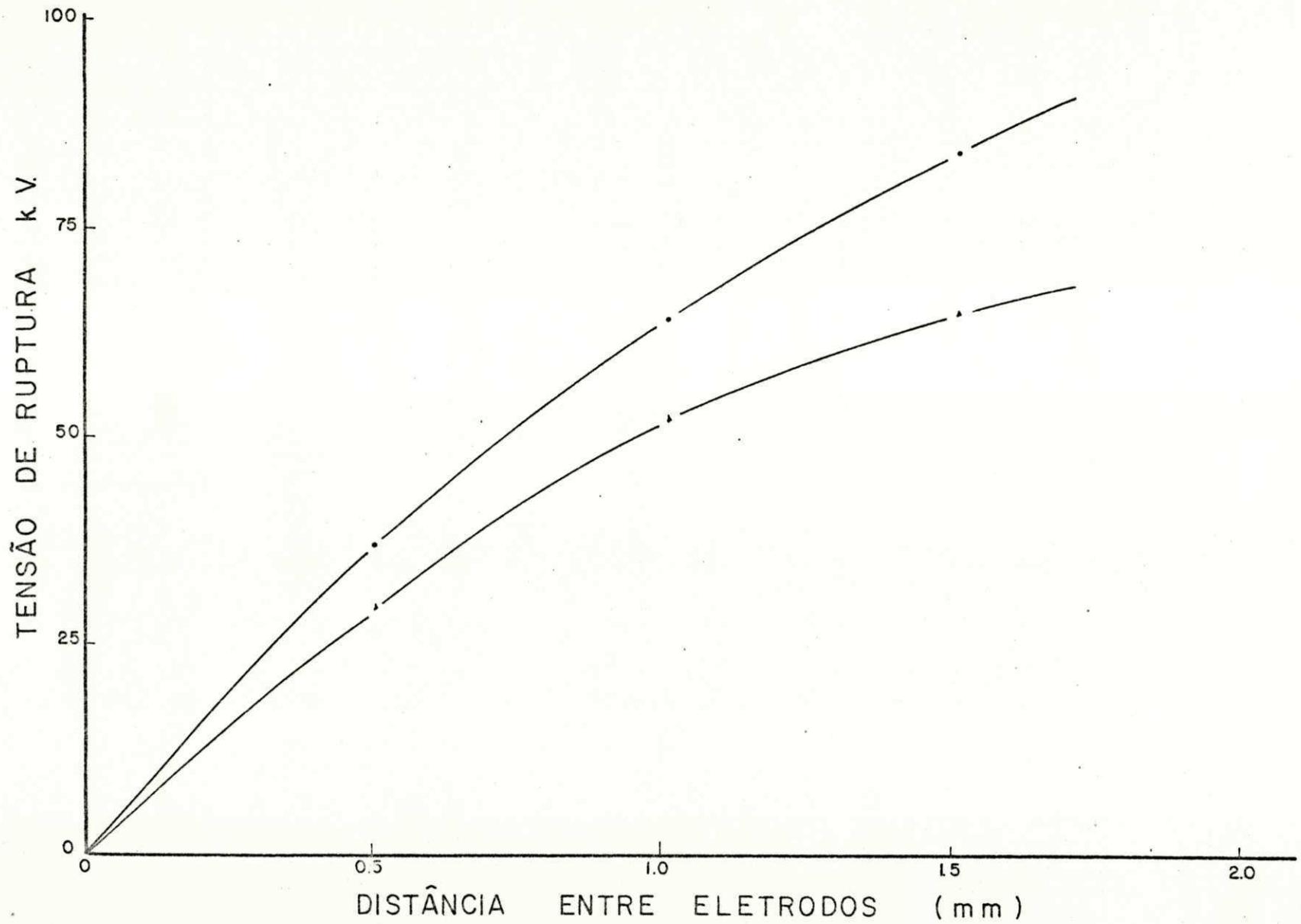


Fig. 4.8 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.

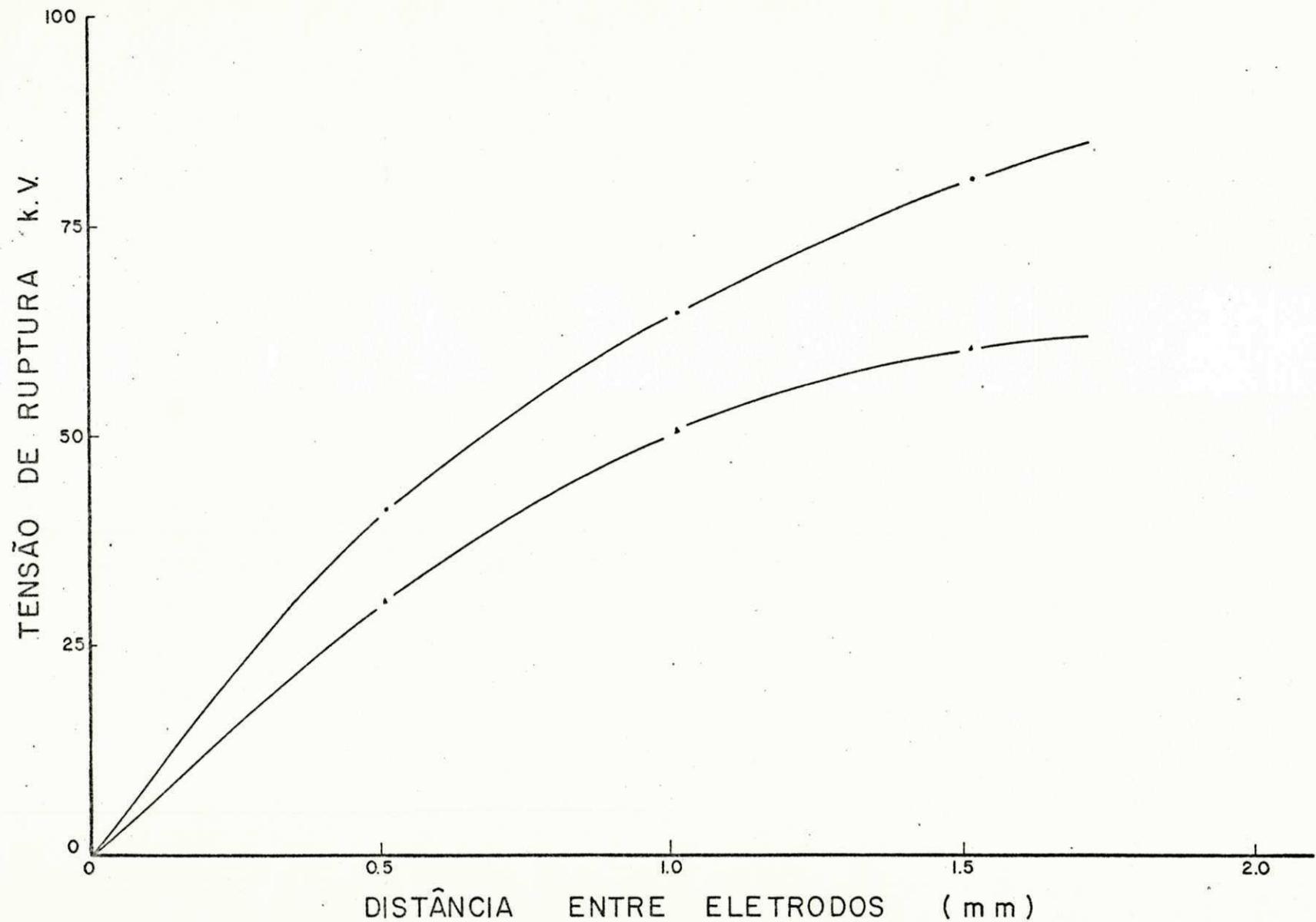


Fig. 4.9 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 15 mm de raio - hemisférico.

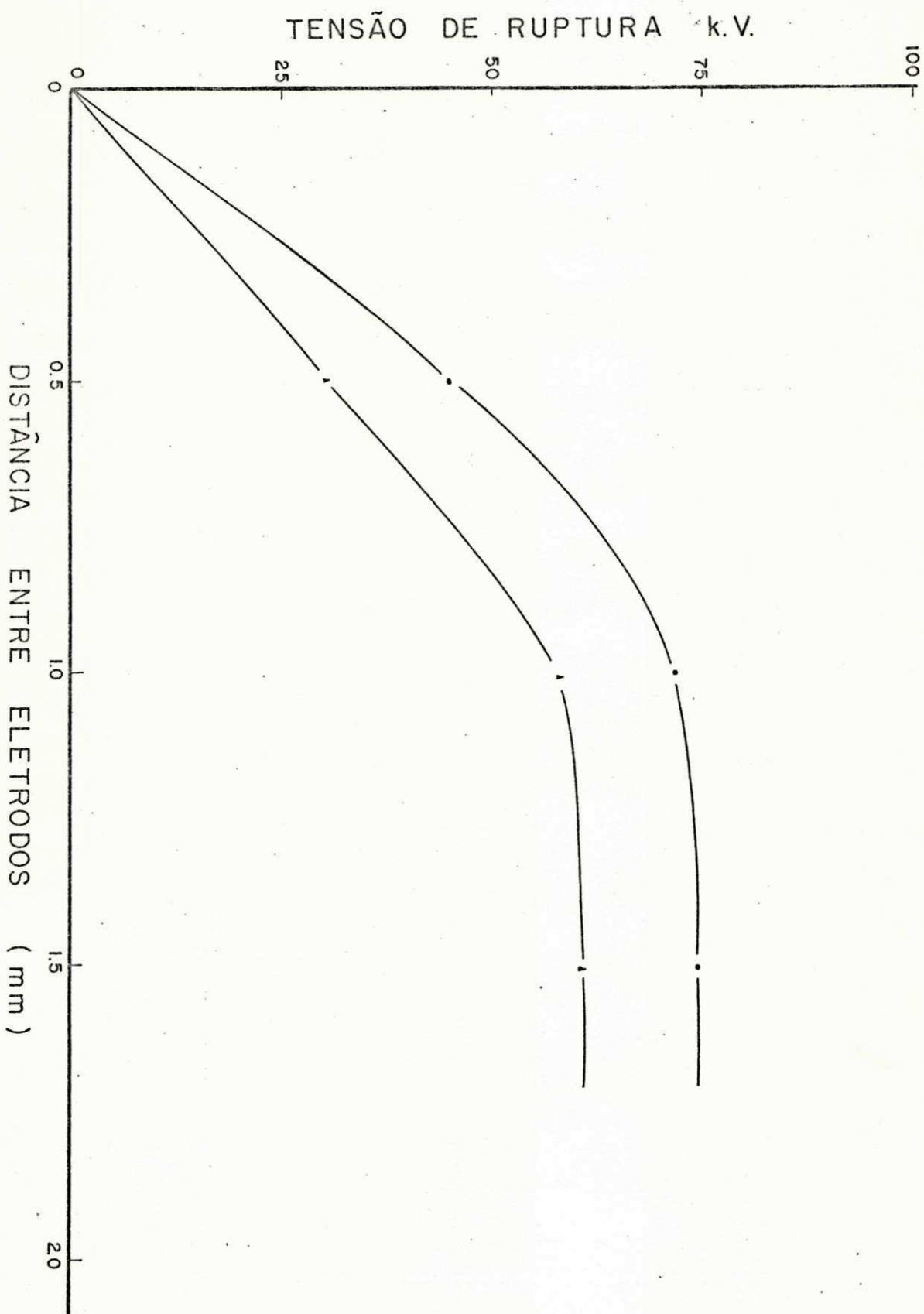
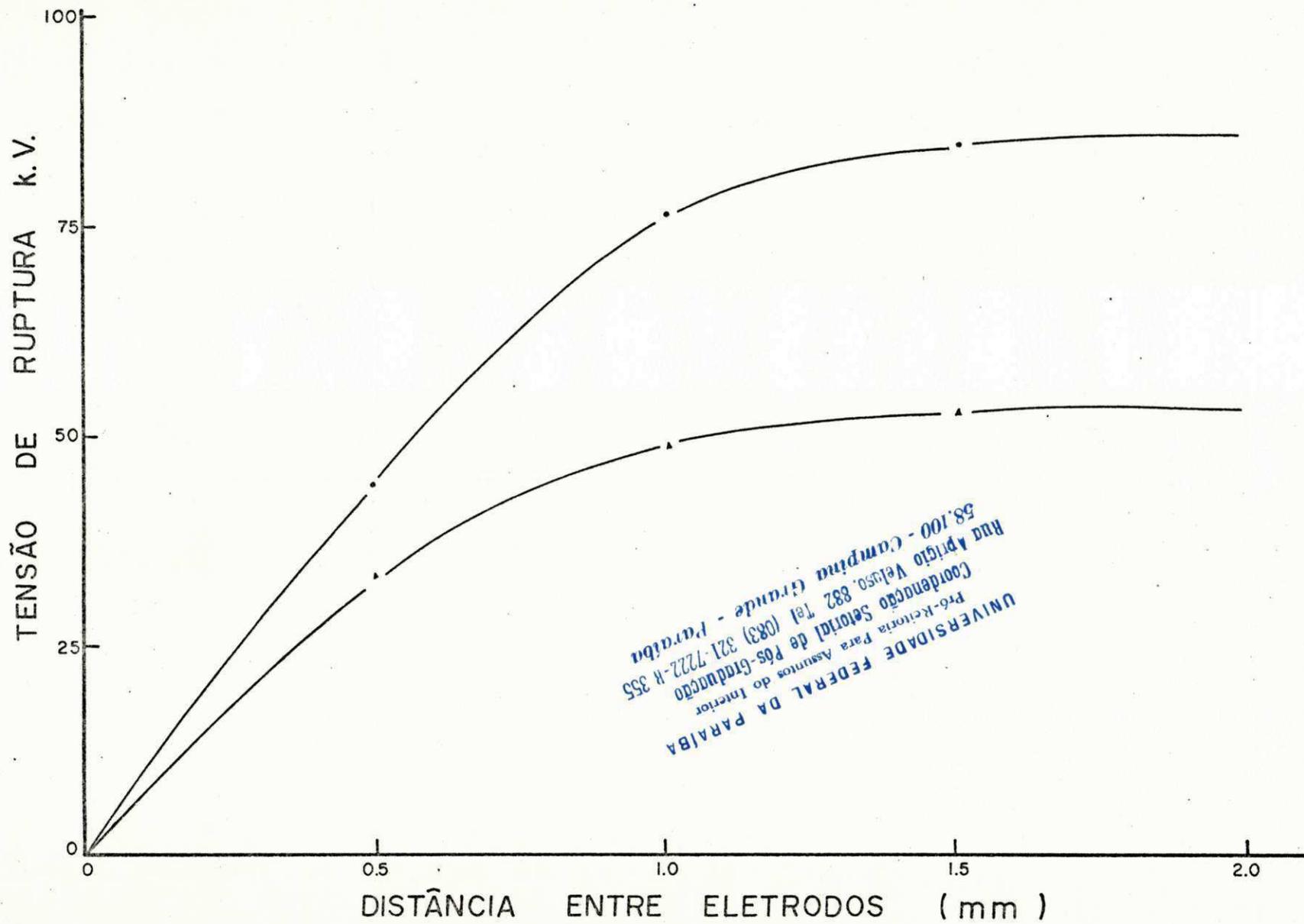


Fig. 4.10 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 19 mm de raio - hemisférico.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 832, Tel (083) 321-7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

Fig. 4.11 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 0,2 mm de raio - hemisférico.

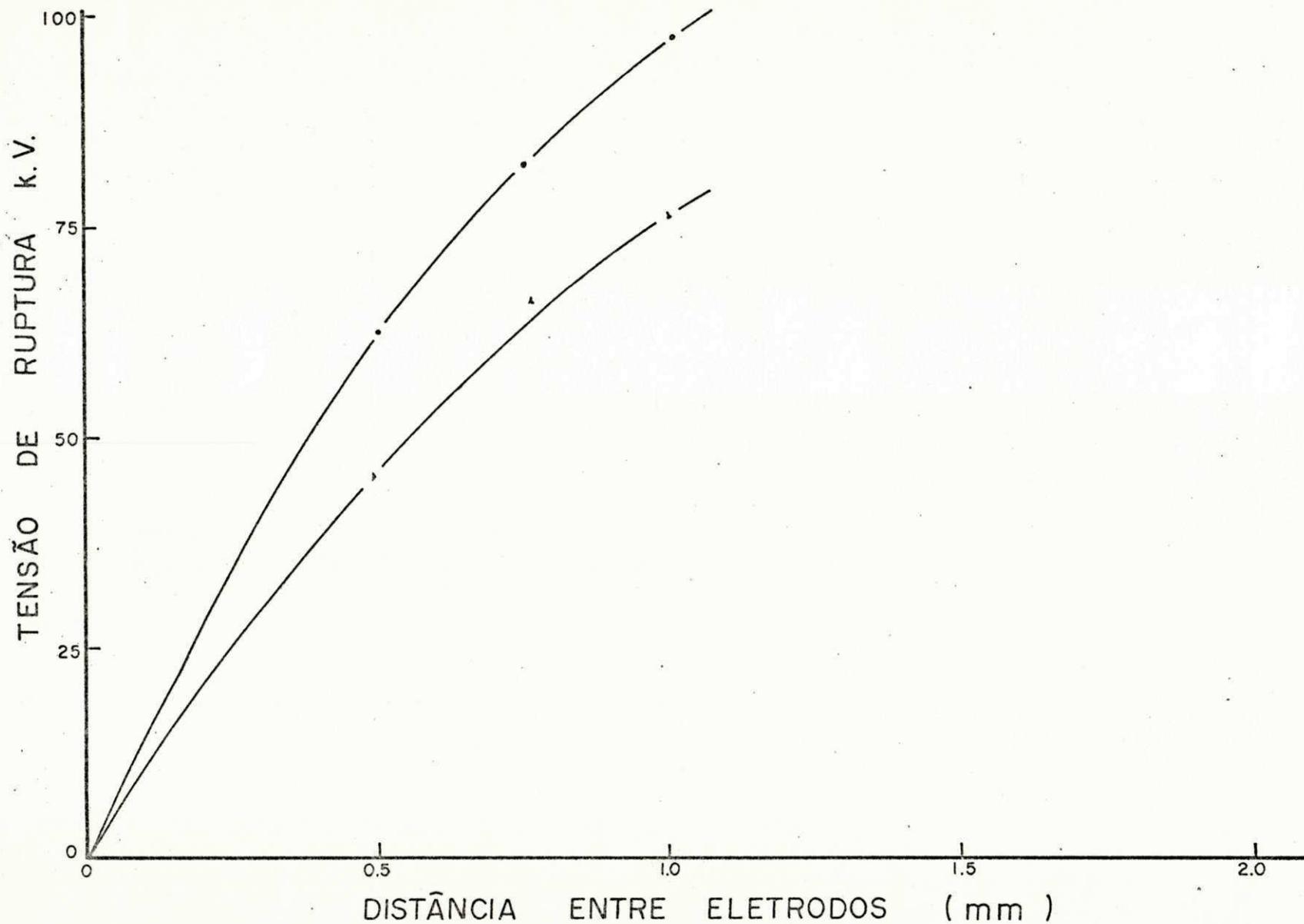


Fig. 4.12 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.

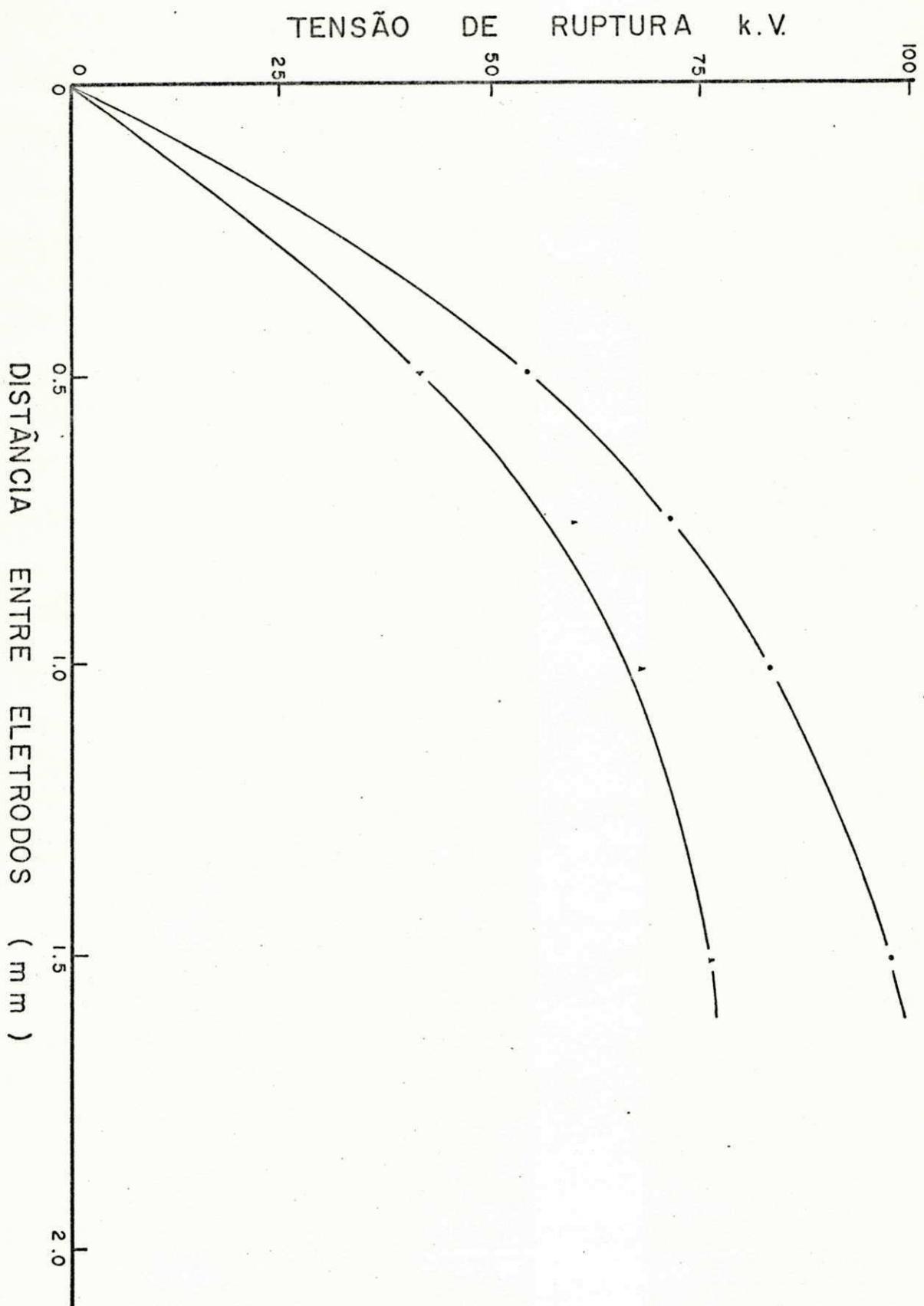


Fig. 4.13 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.

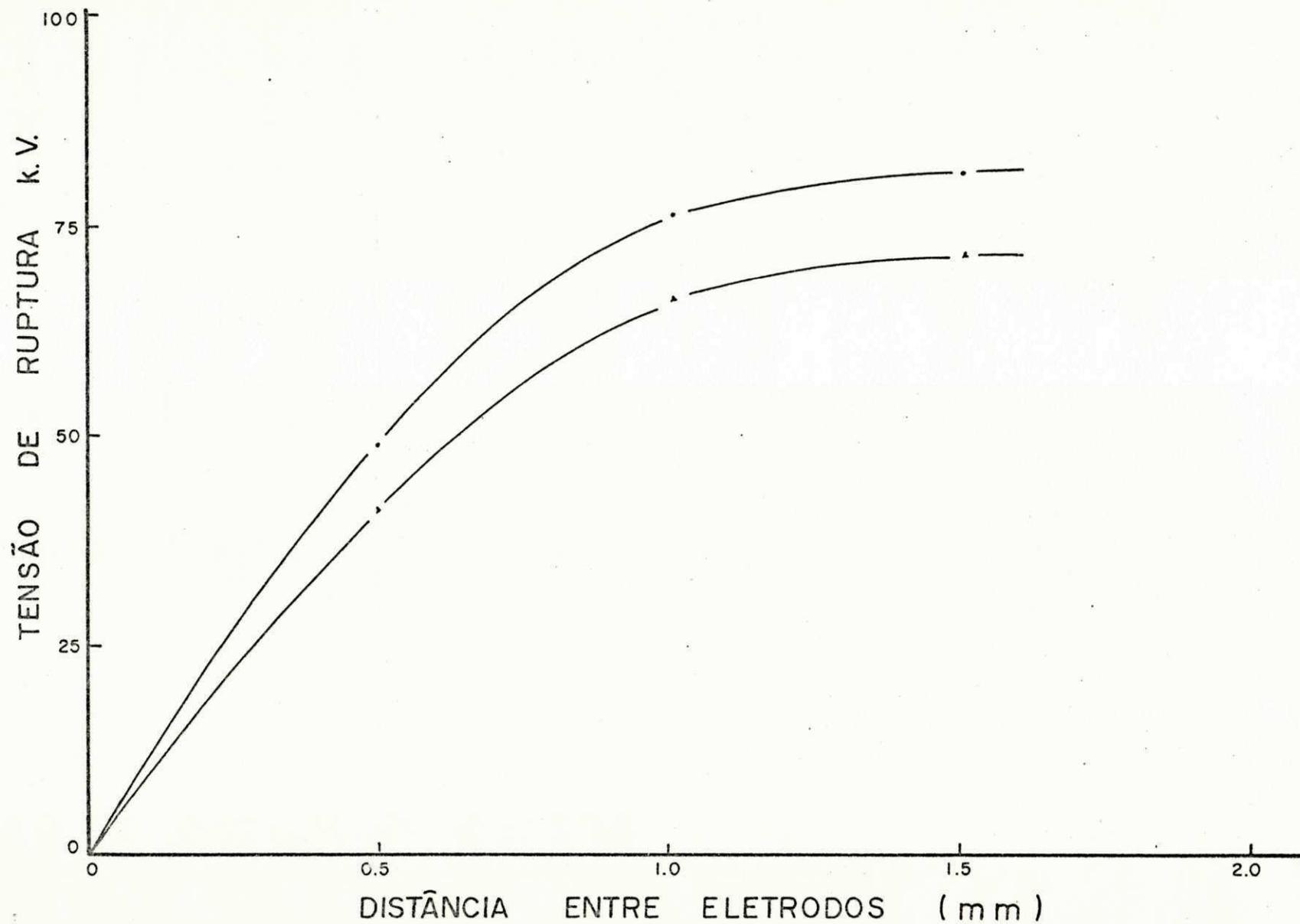


Fig. 4.14 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 15 mm de raio - hemisférico.

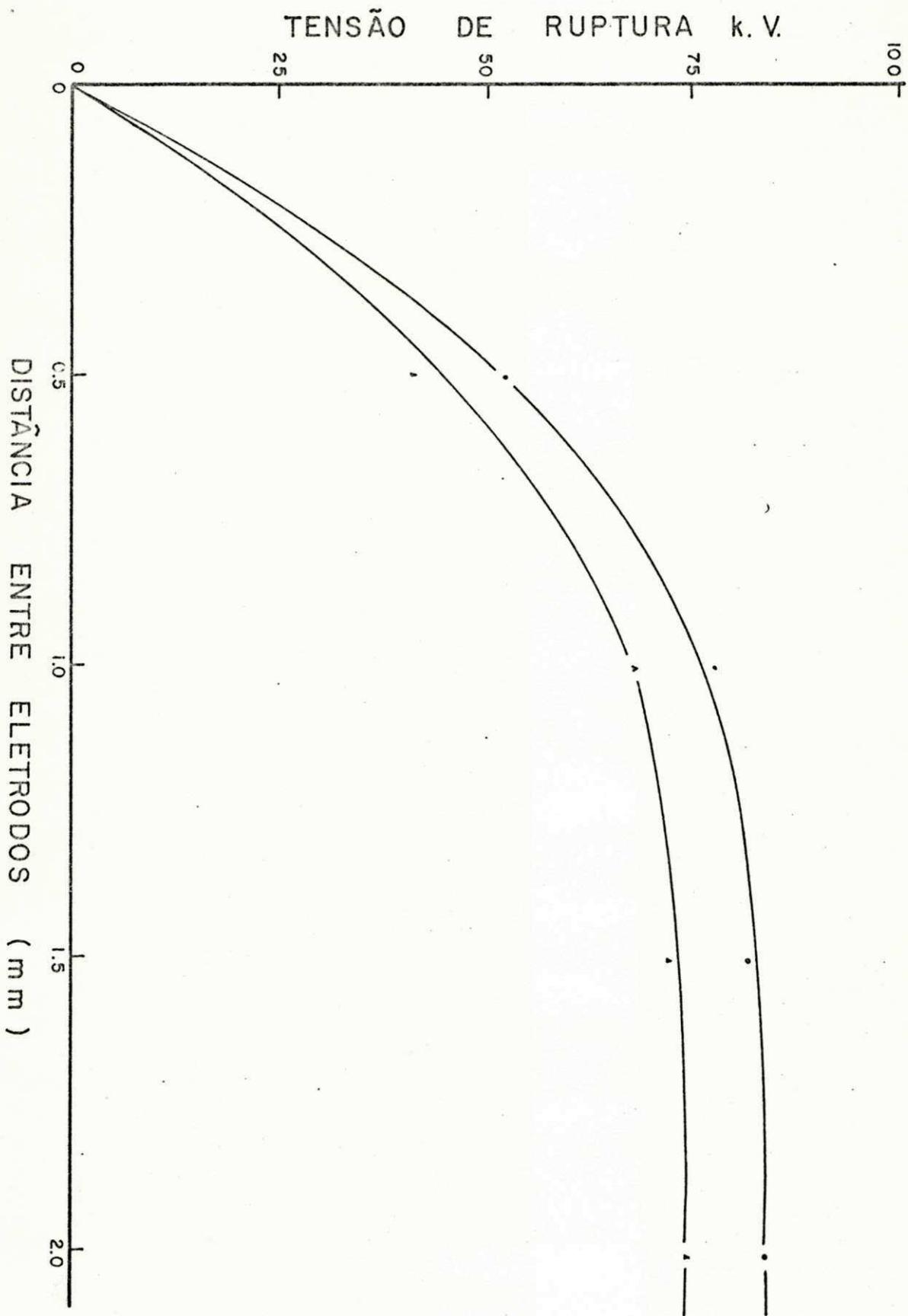


Fig. 4.15 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 19 mm de raio - hemisférico.

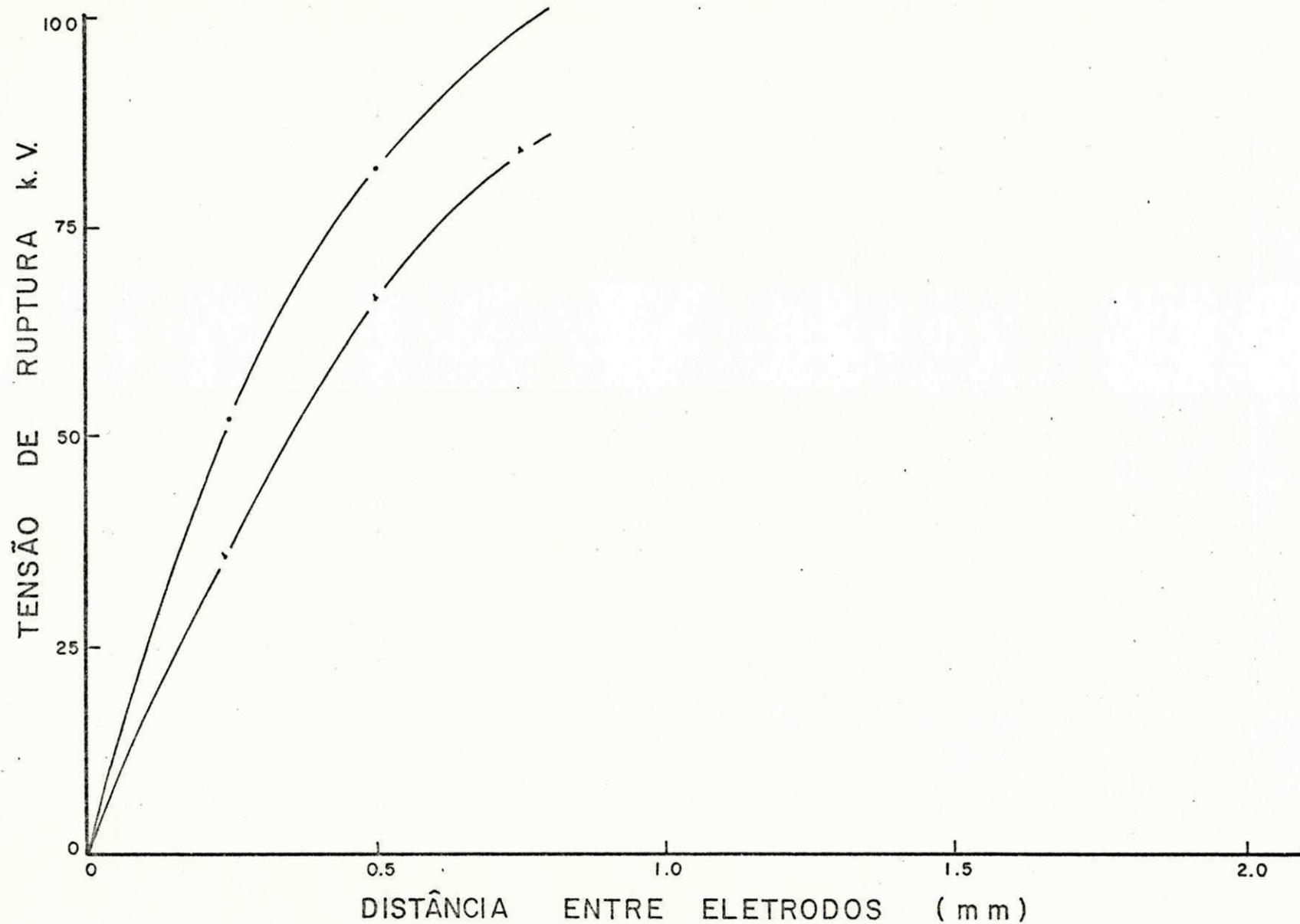


Fig. 4.16 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.

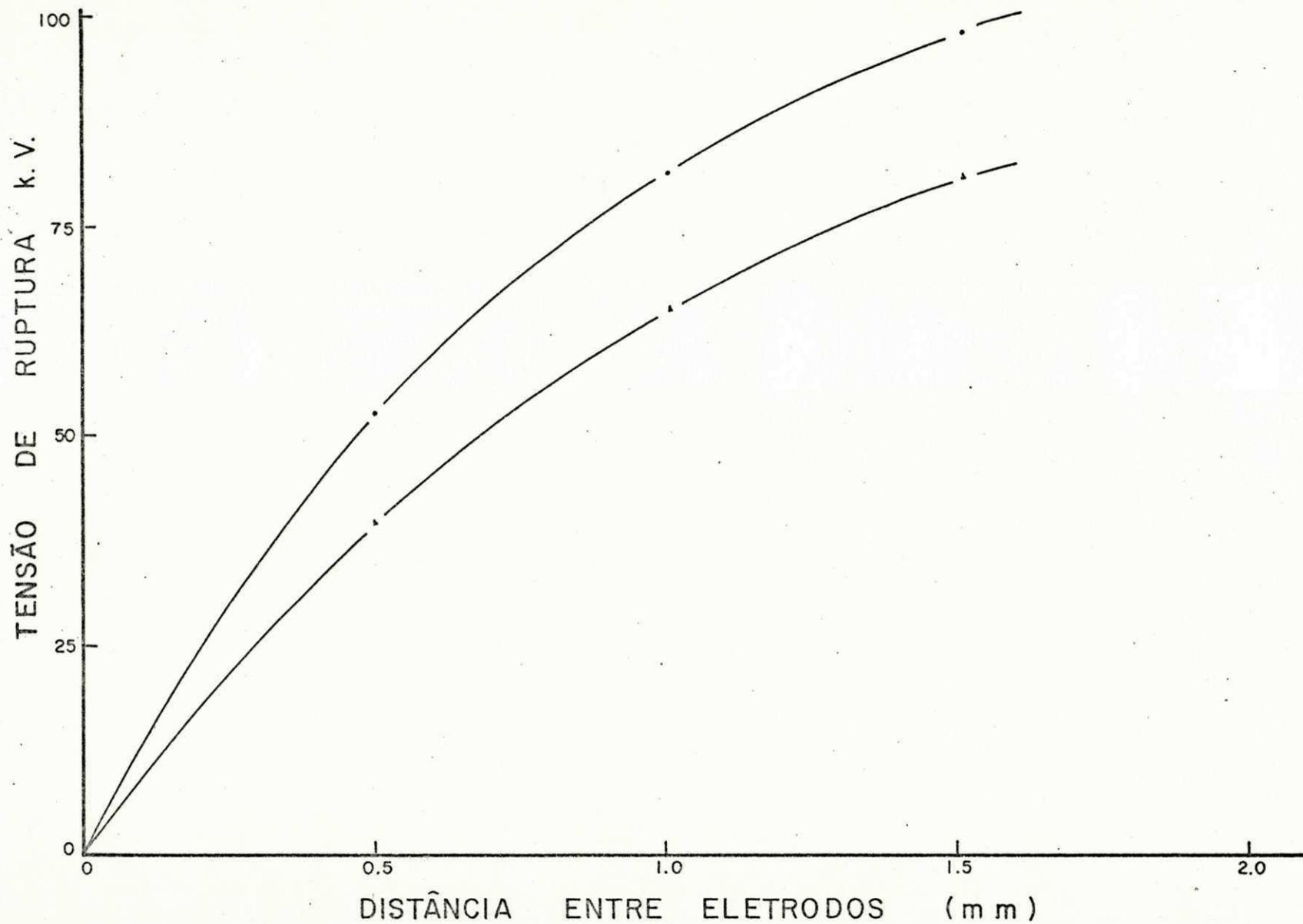
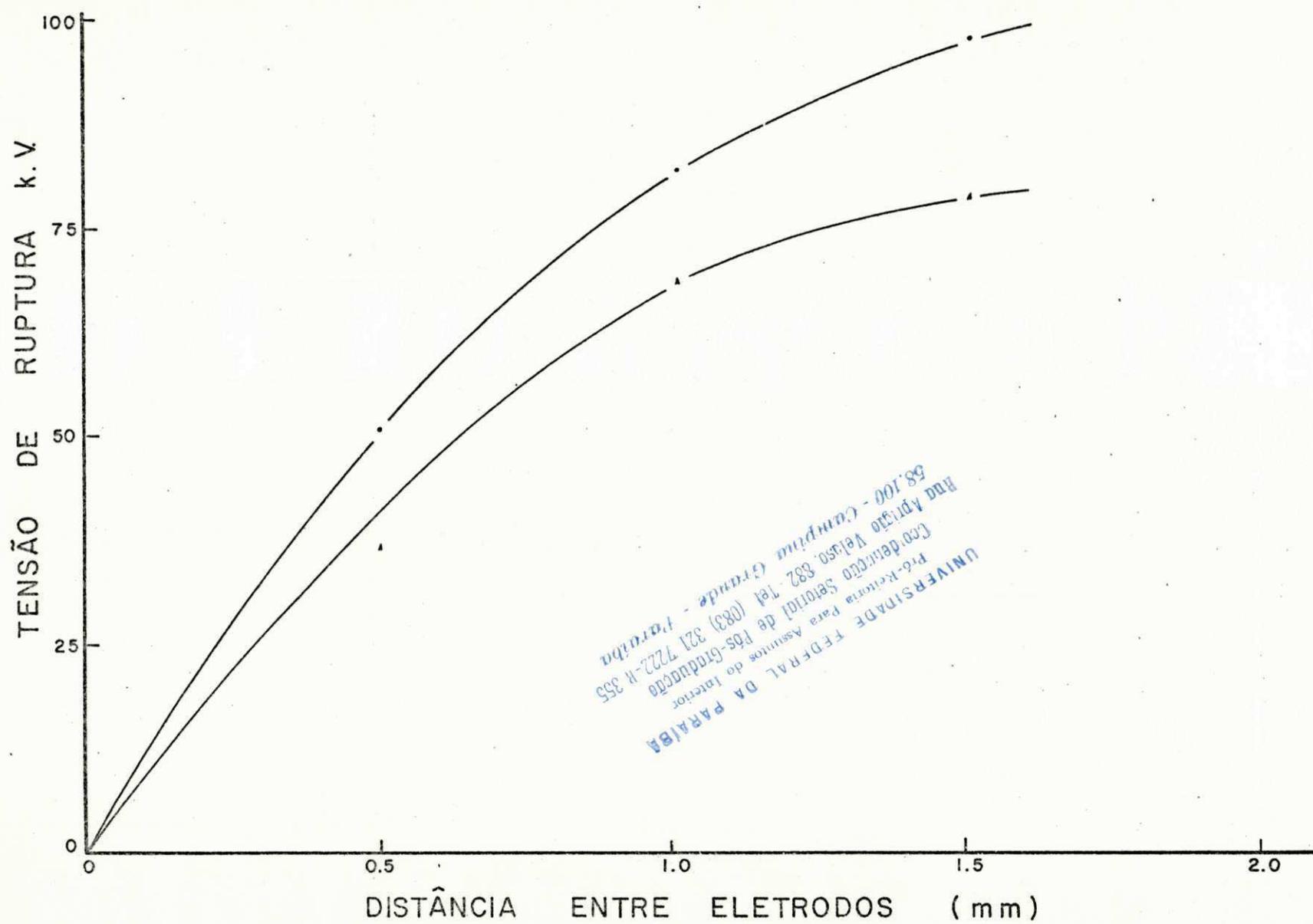


Fig. 4.17 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria para Assuntos do Interior
 Coordenador Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprício Veloso, 882-741 (083) 321-7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

Fig. 4.18 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 15 mm de raio - hemisférico.

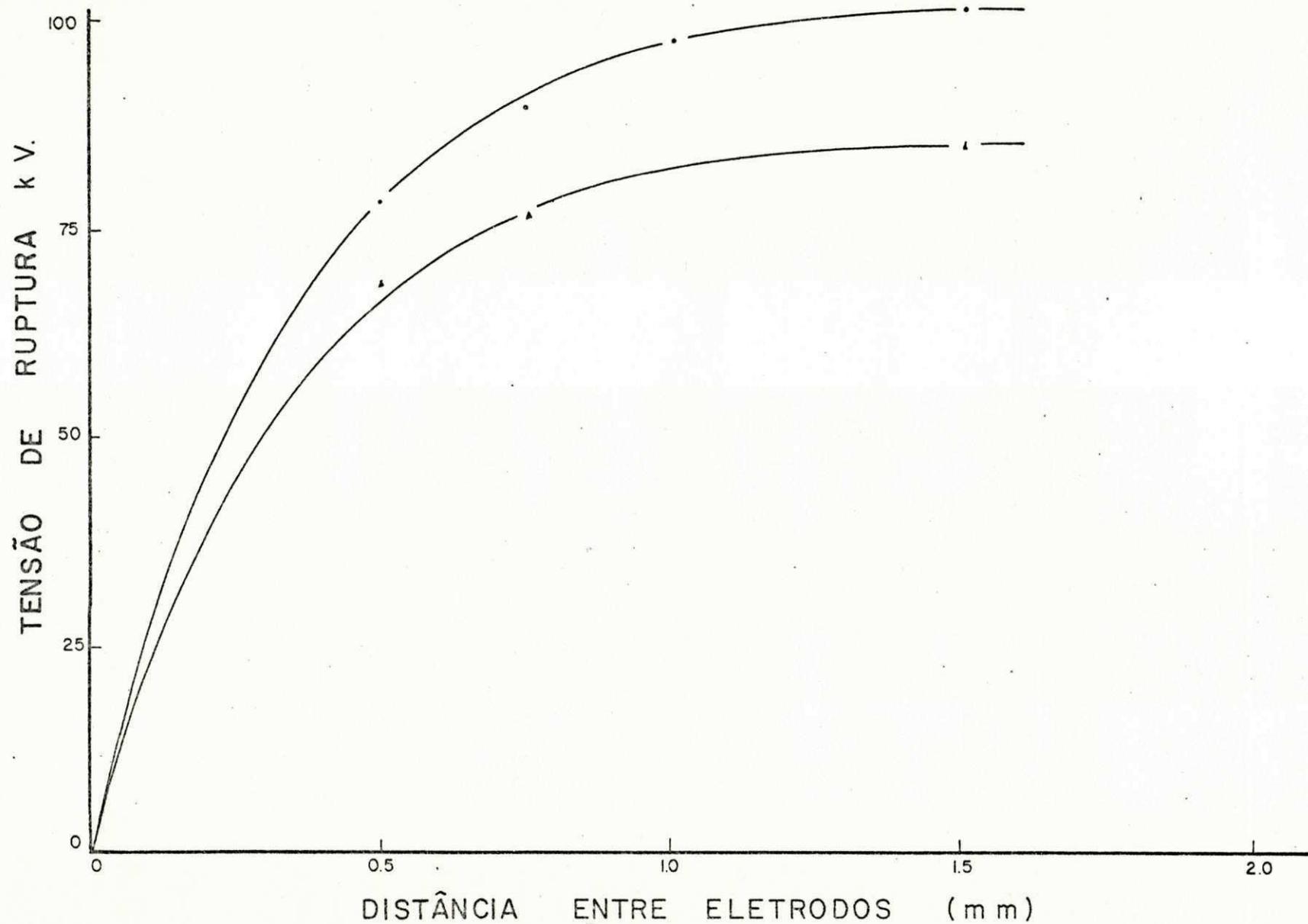


Fig. 4.19 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 19 mm de raio - hemisférico.

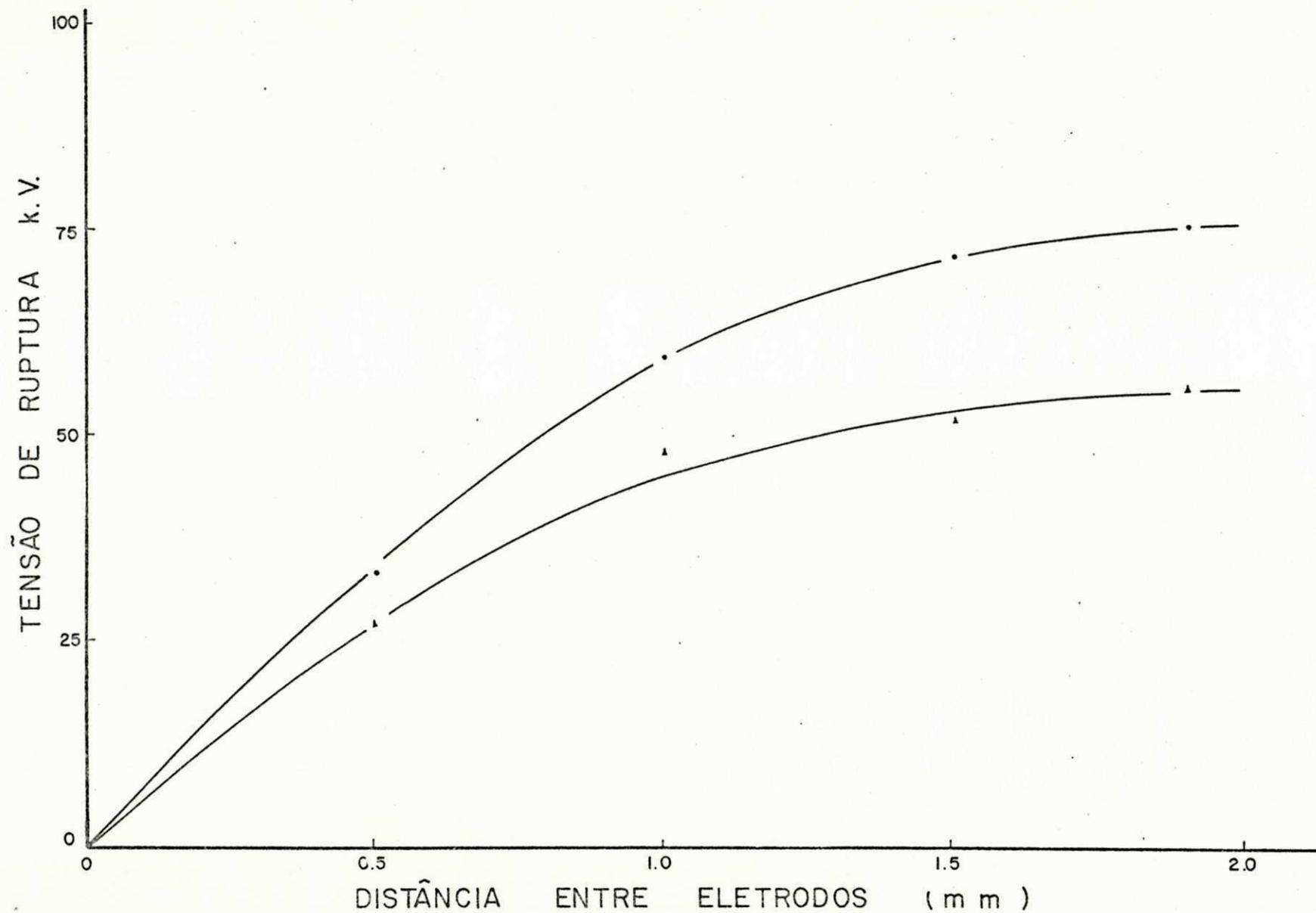


Fig. 4.20 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 0,2 mm de raio - hemisférico.



Fig. 4.21 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.

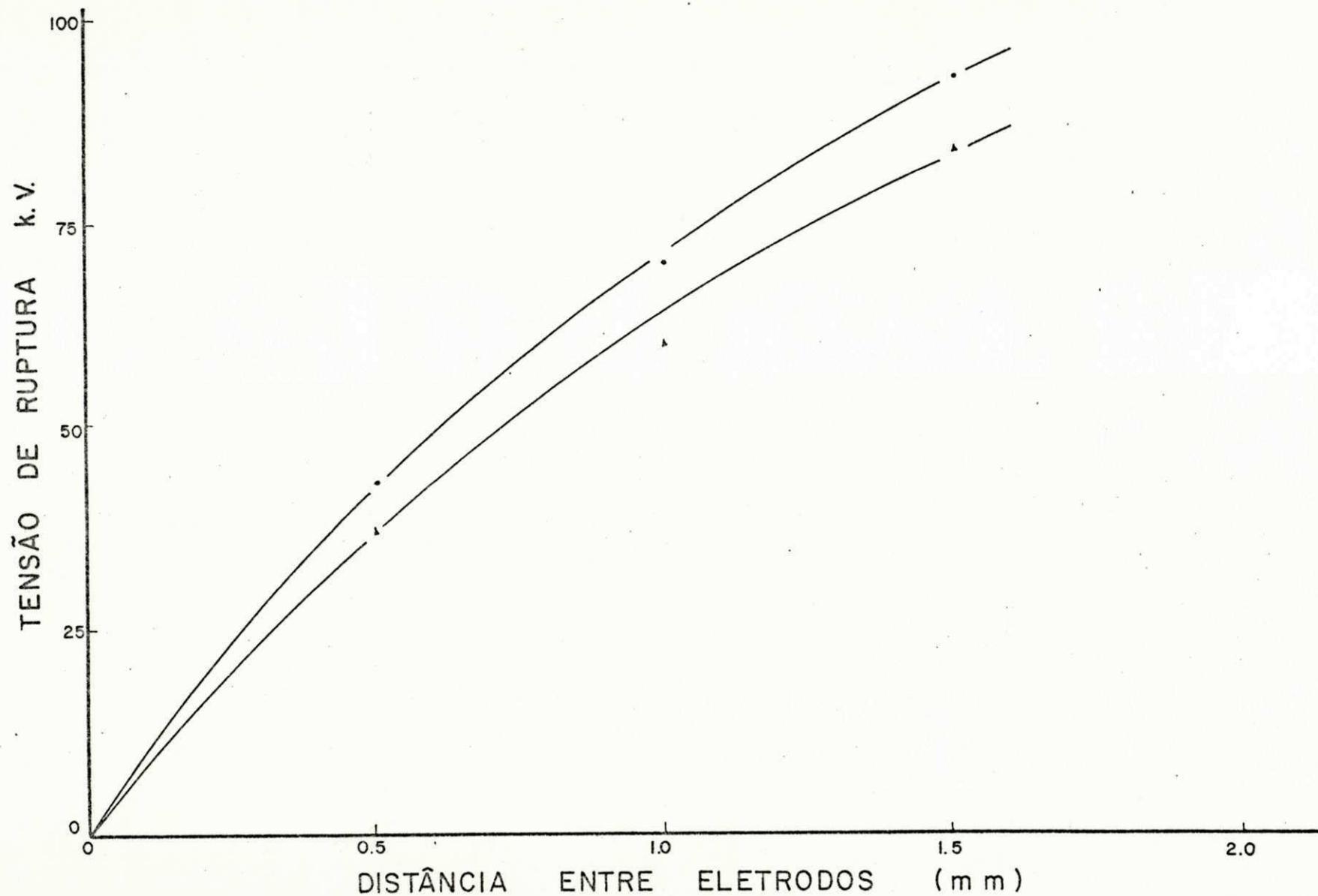


Fig. 4.22 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.

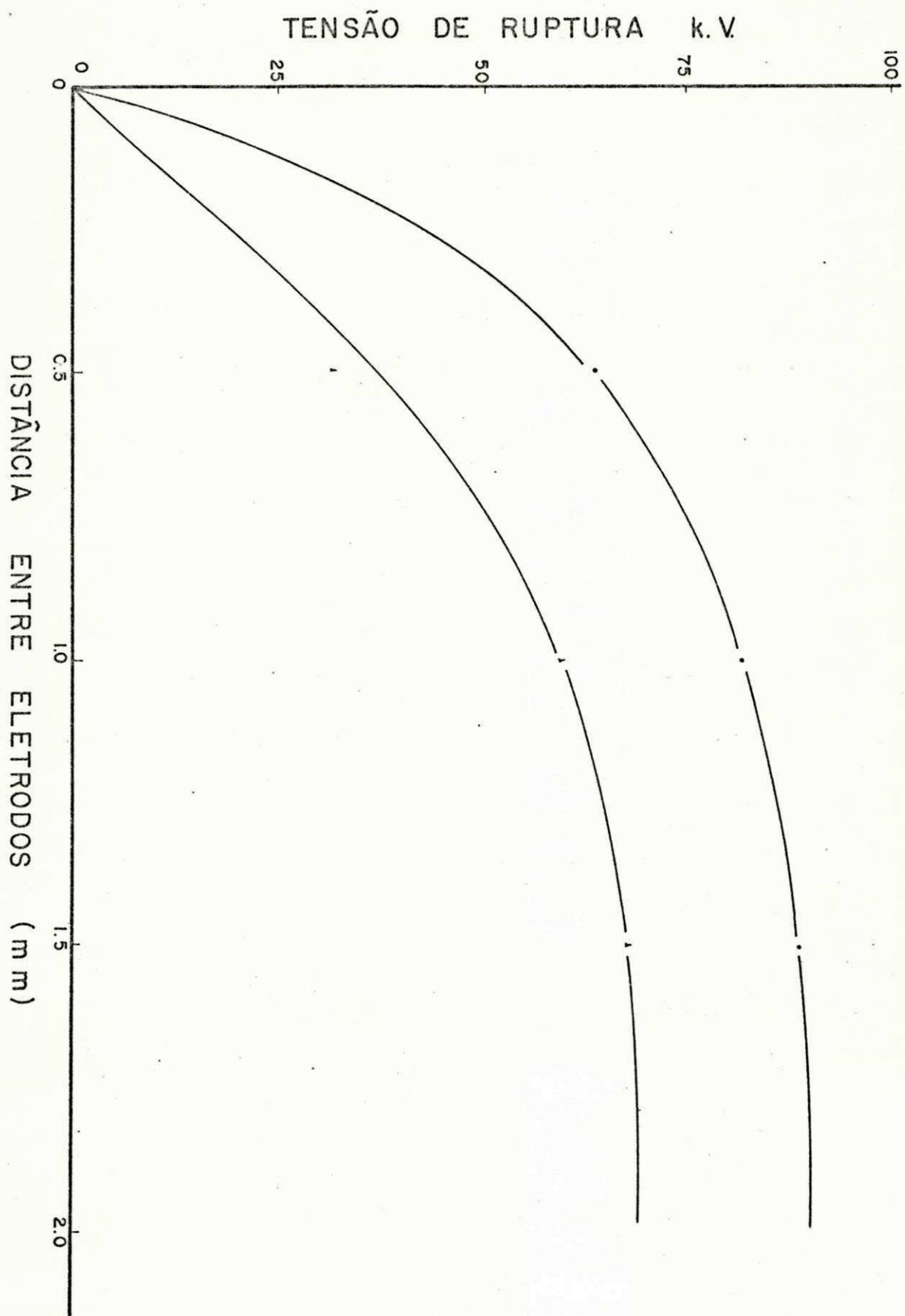


Fig. 4.23

Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 15 mm de raio - hemisférico.

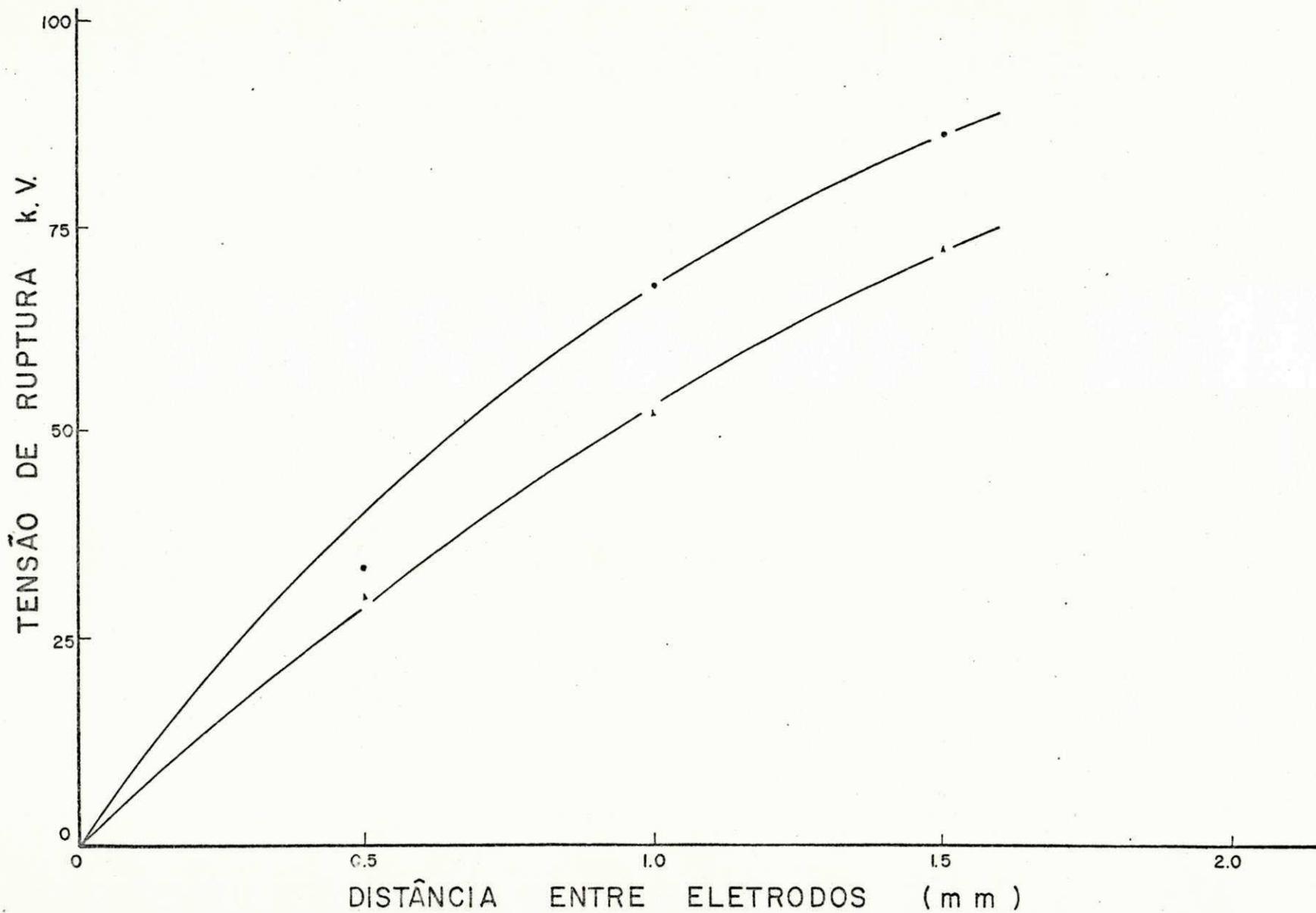


Fig. 4.24 Faixa de variação da tensão de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 19 mm de raio - hemisférico.

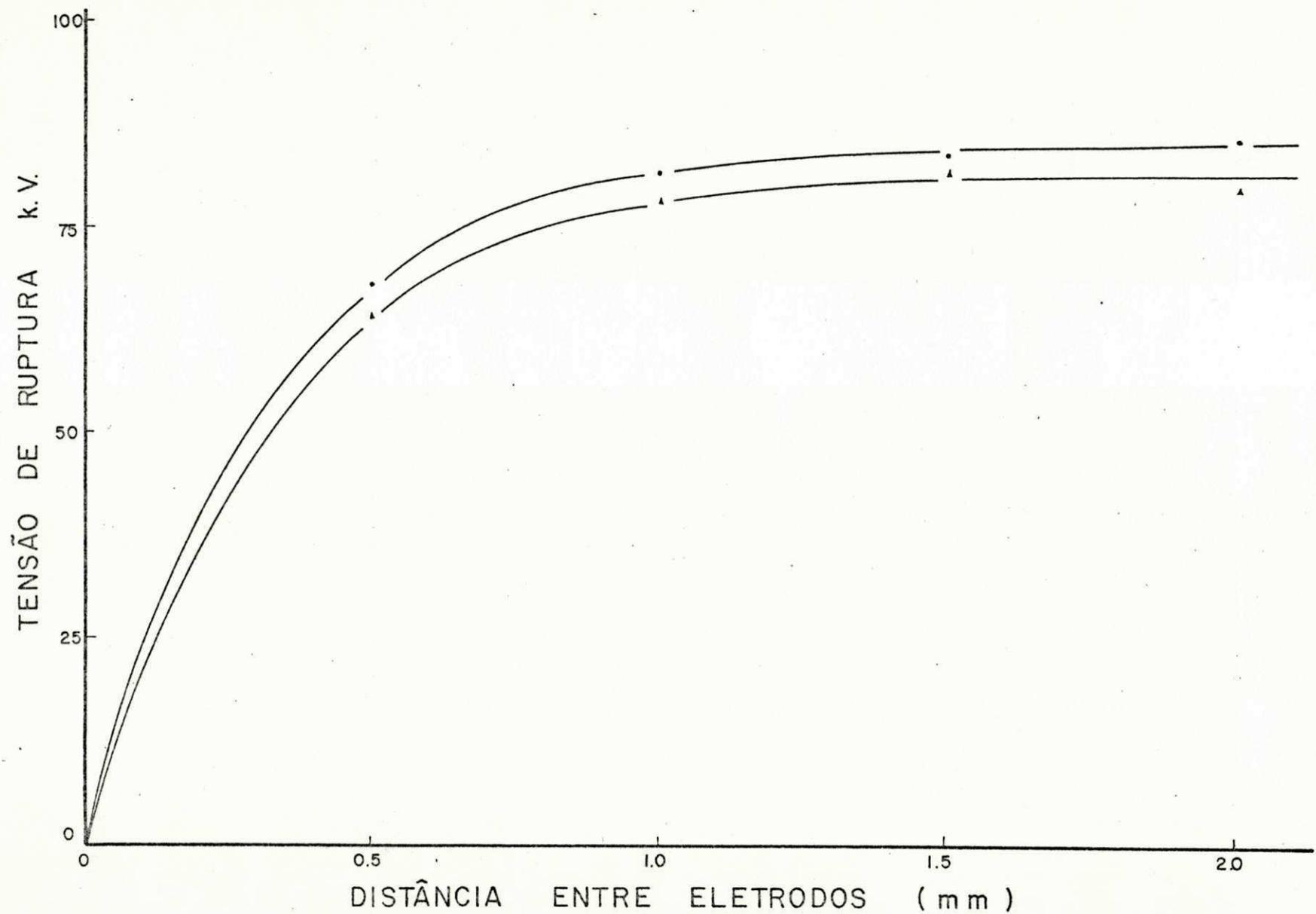


Fig. 4.25 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 0,2 mm de raio - hemisférico.

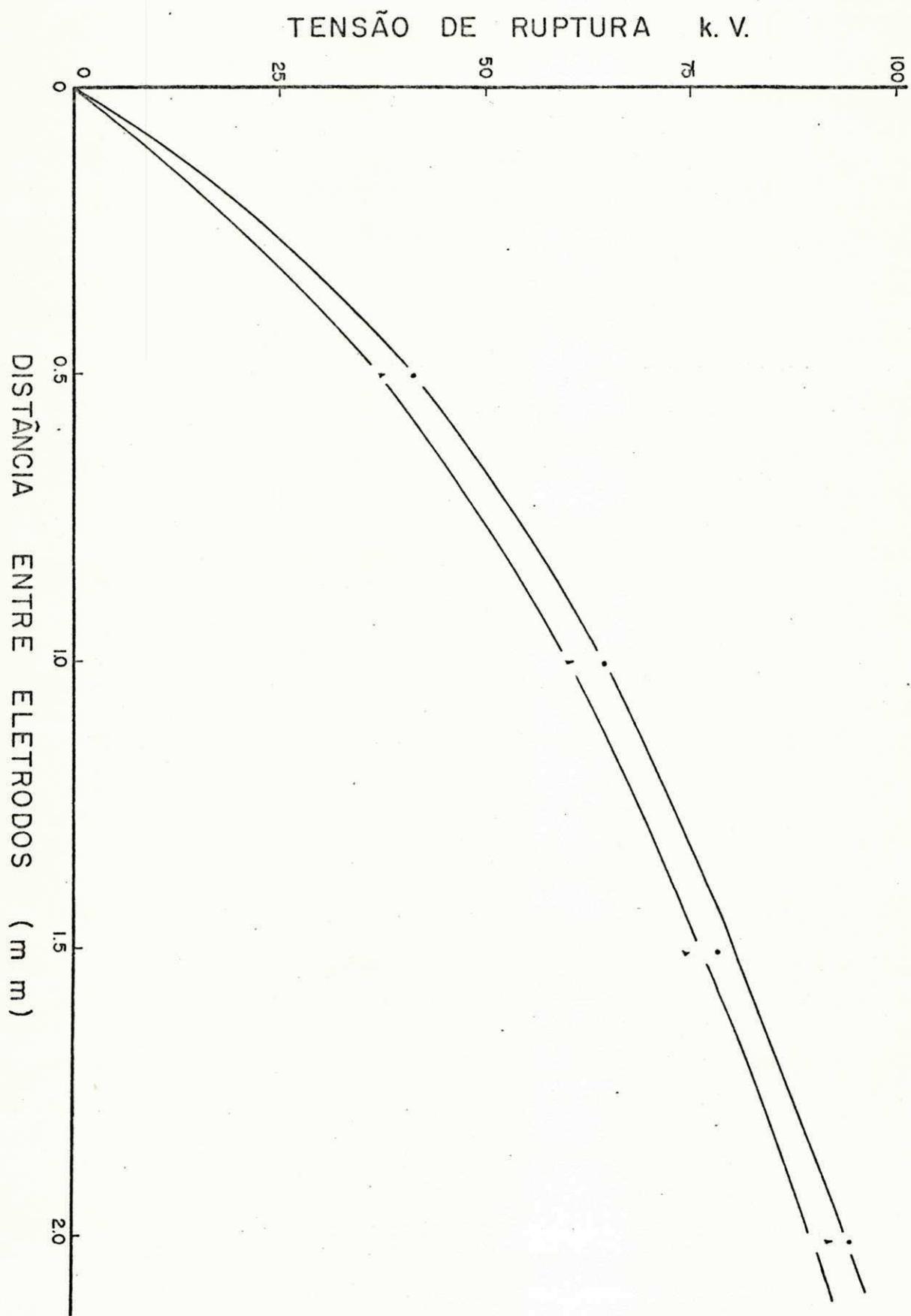
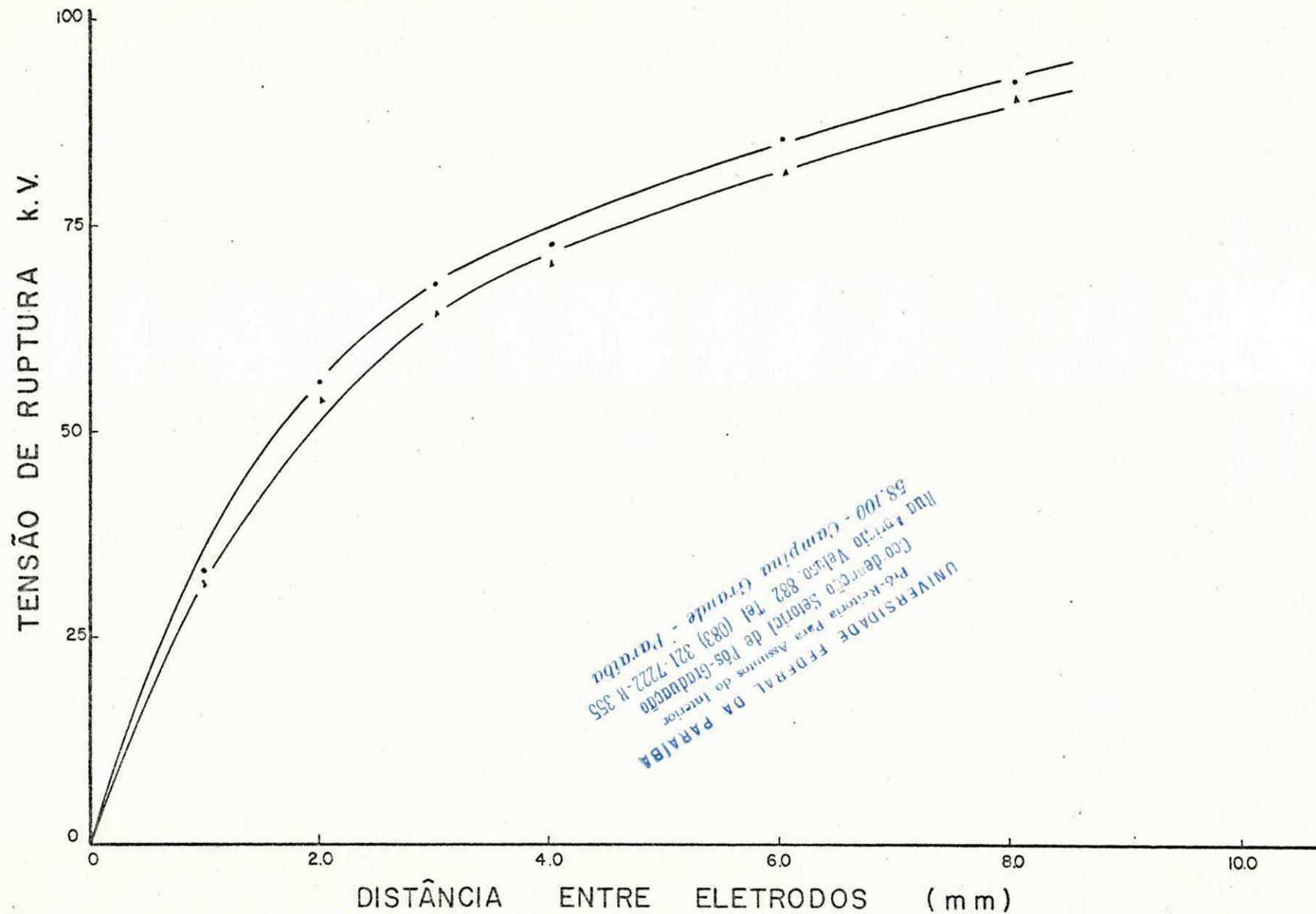


Fig. 4.26 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Lago de Santa Helena 882 Tel (083) 321-7222-R 355
 Rua Alberto Coimbra Grande - Paraíba
 58.100 - Campina

Fig. 4.27 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.

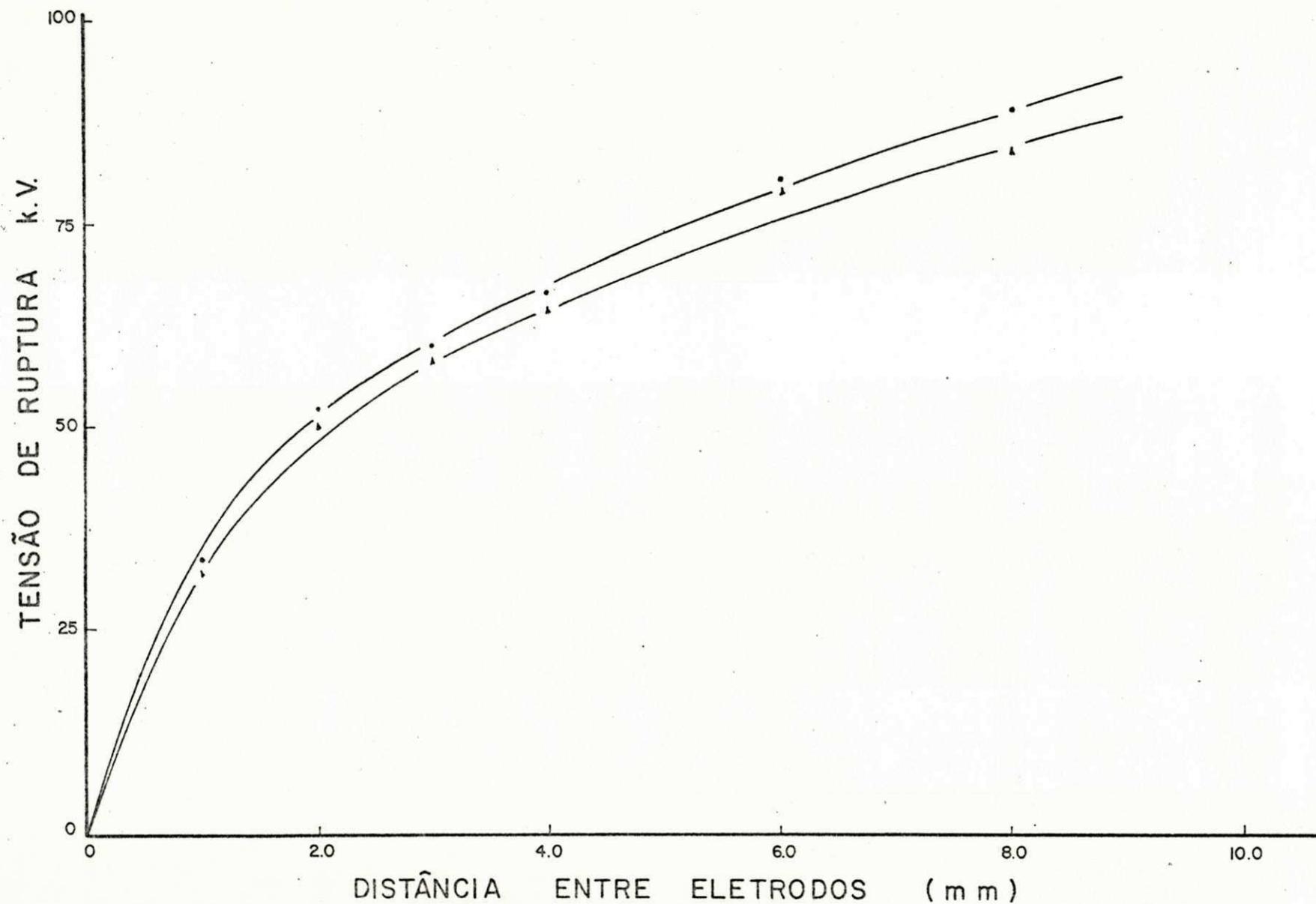


Fig. 4.28 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 15 mm de raio - hemisférico.

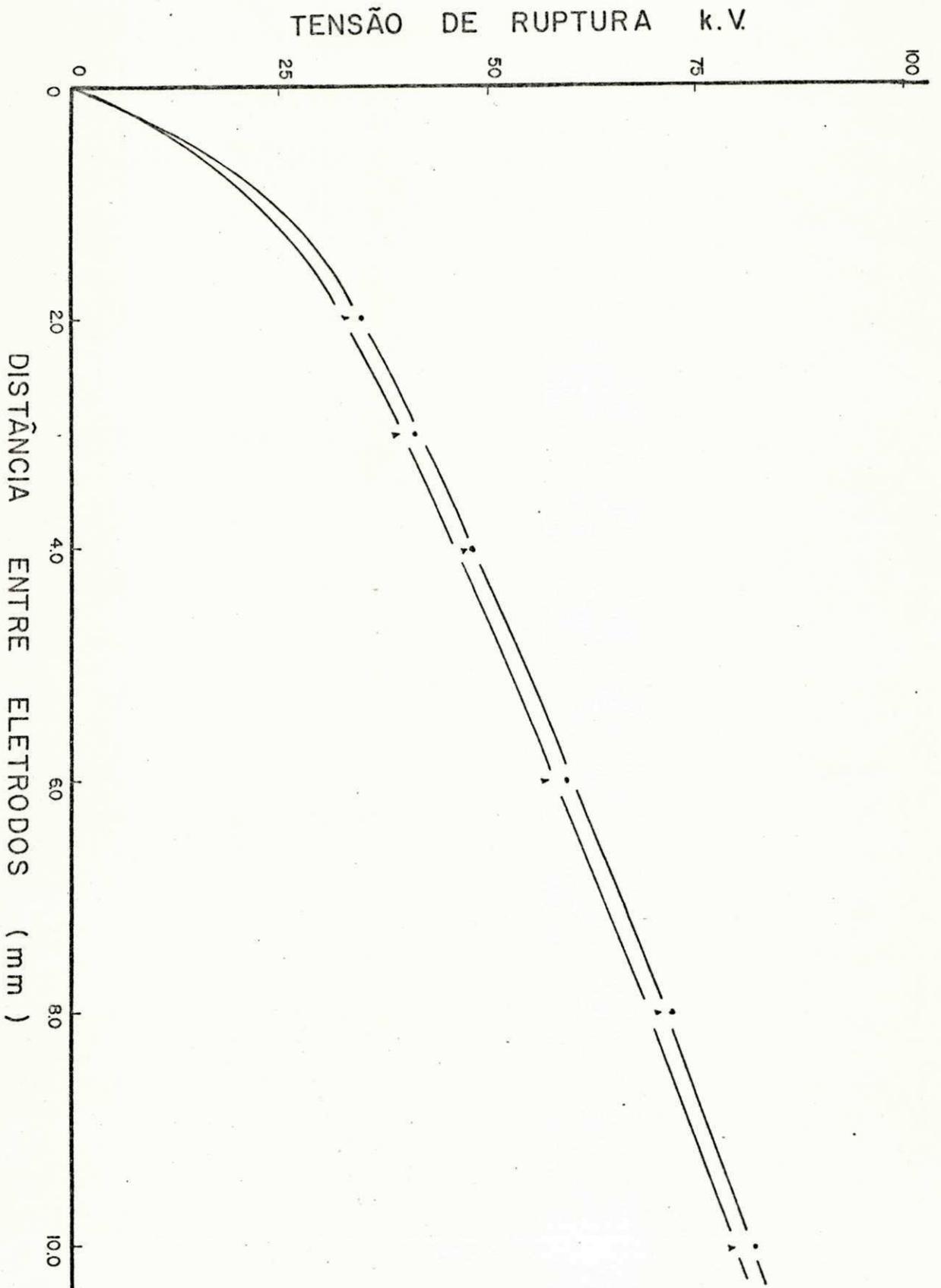


Fig. 4.29 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 19 mm de raio - hemisférico.

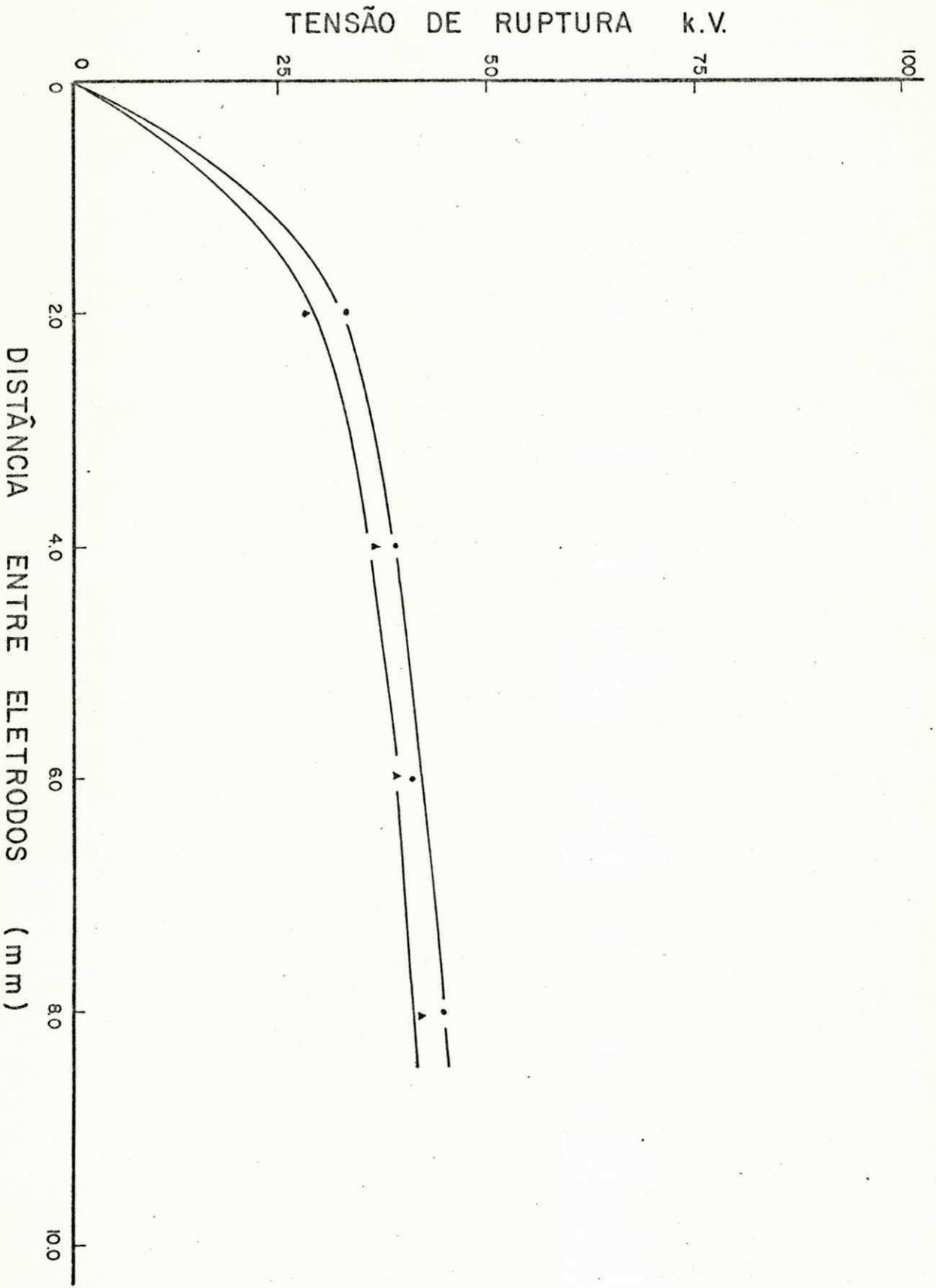


Fig. 4.30 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 0,2 mm de raio - hemisférico.

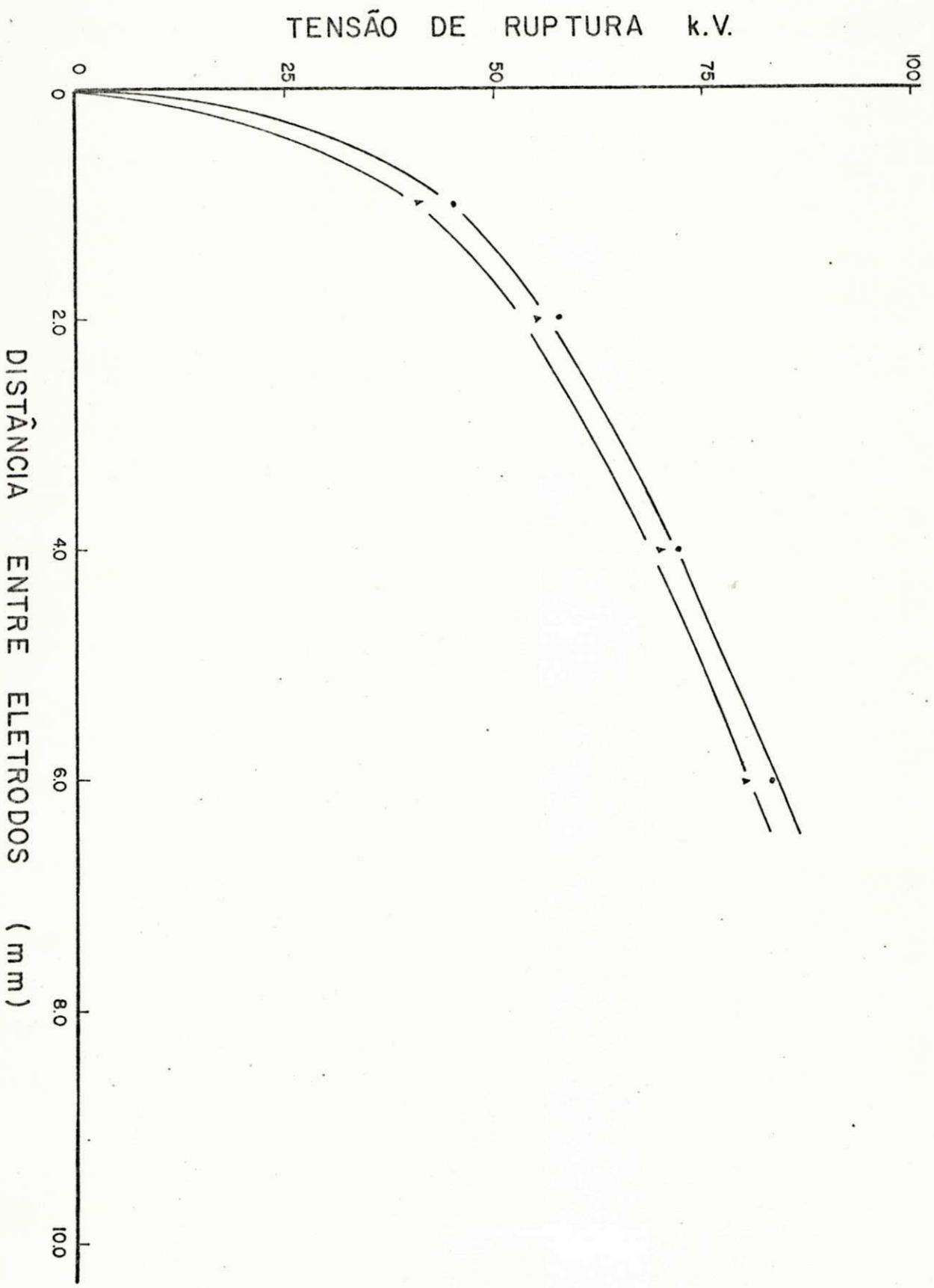


Fig. 4.31 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.

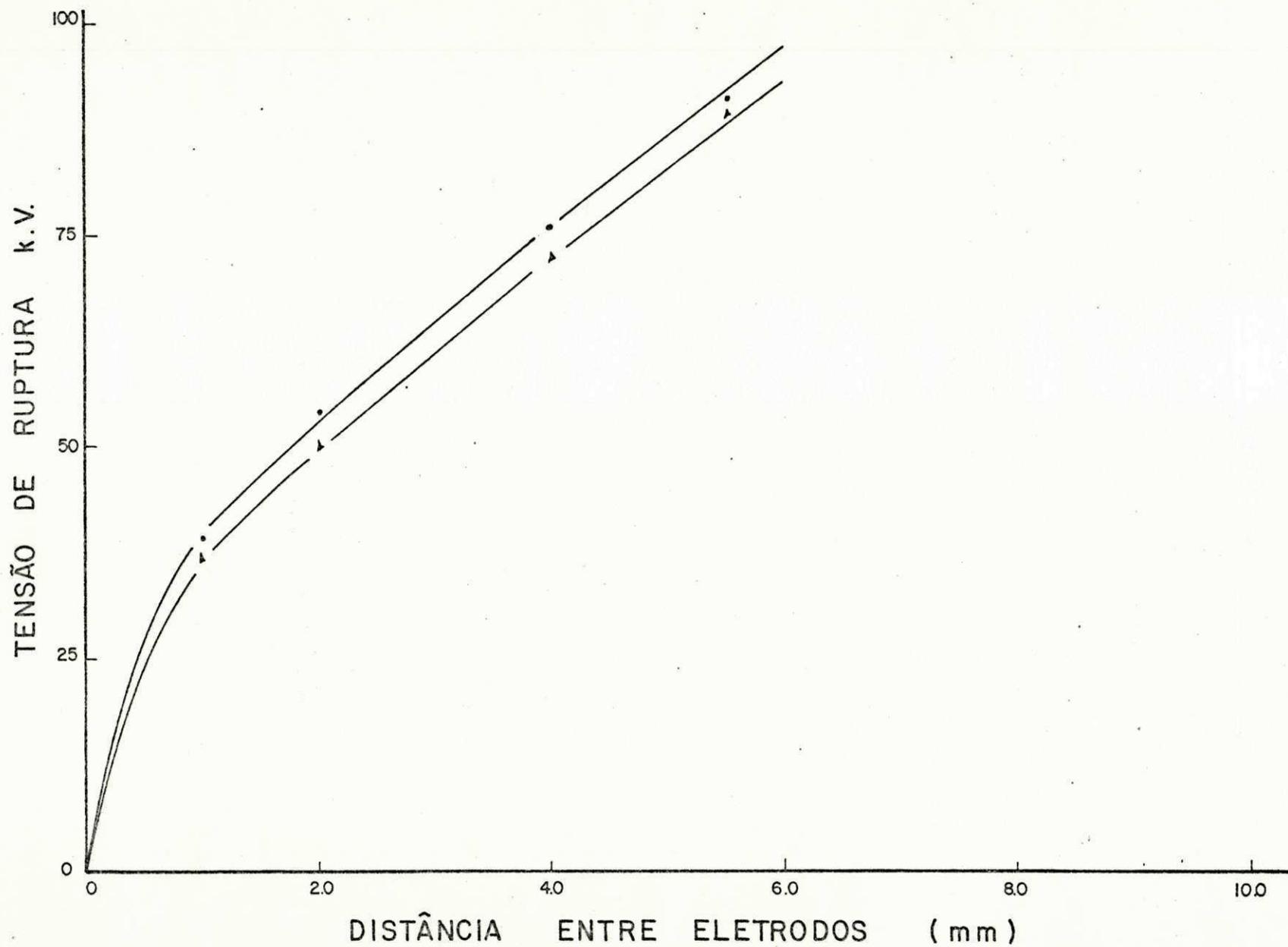


Fig. 4.32 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de bronze com 80 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.

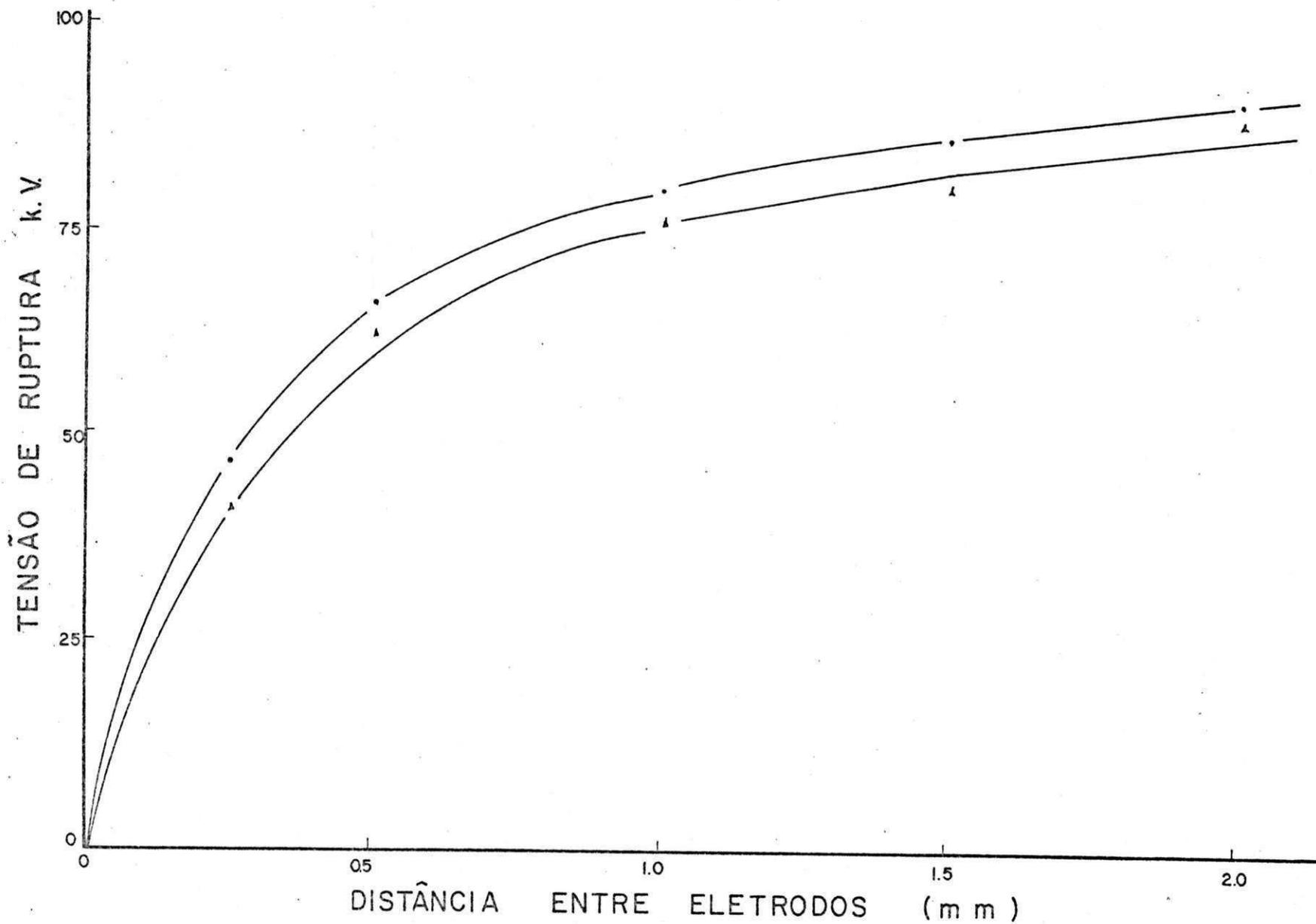


Fig. 4.36 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.

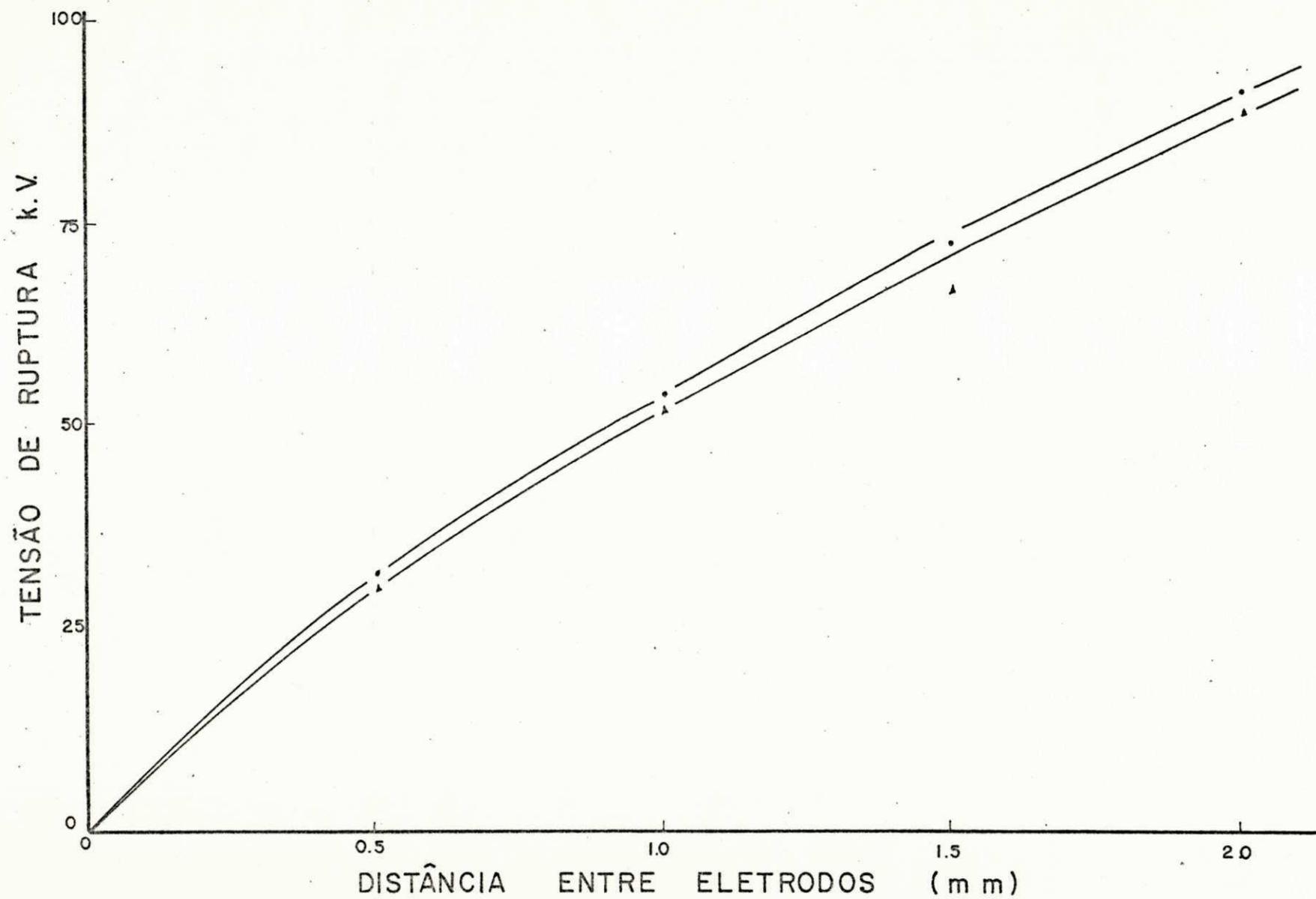


Fig. 4.37 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.

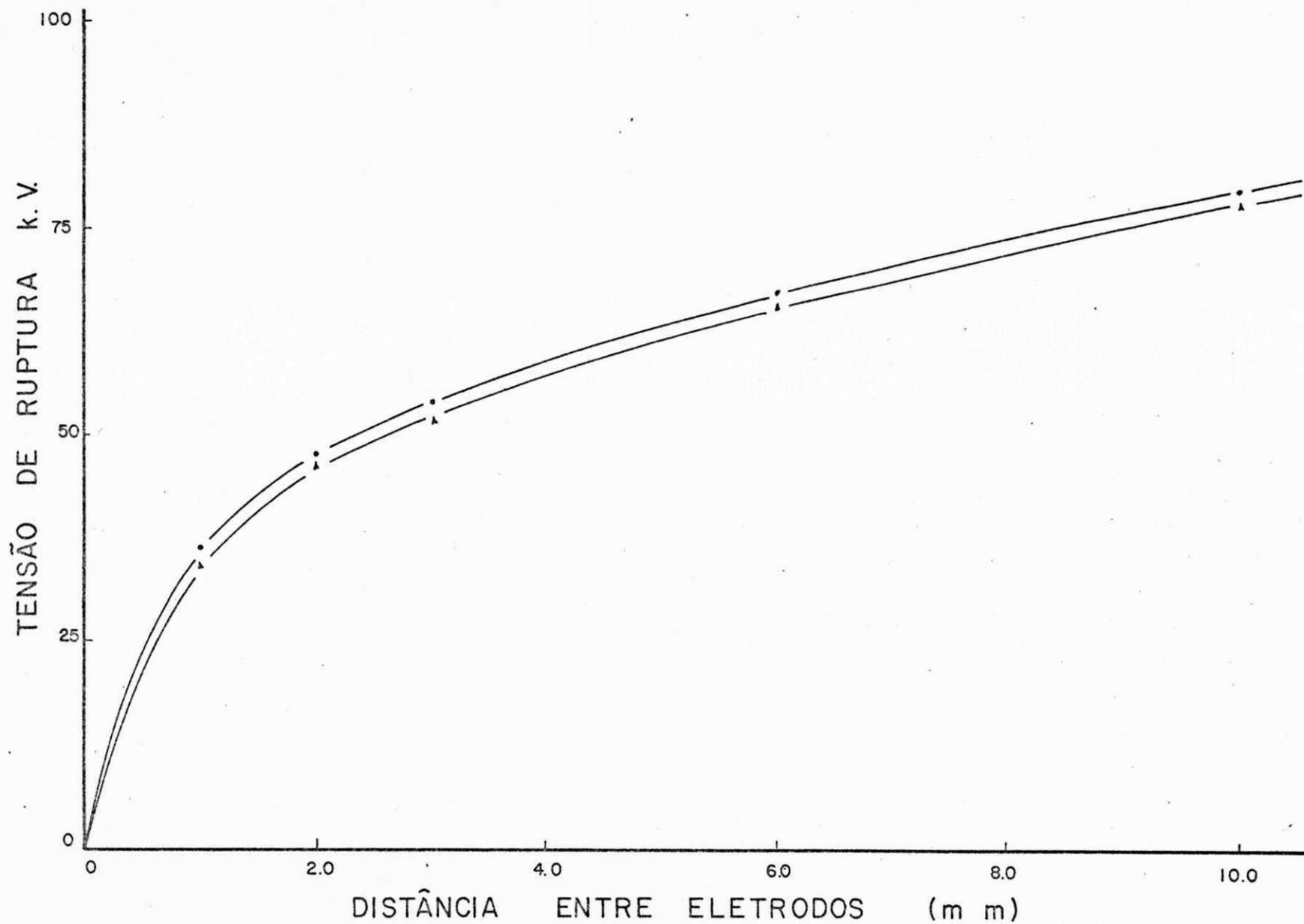


Fig. 4.38 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 15 mm de raio - hemisférico.

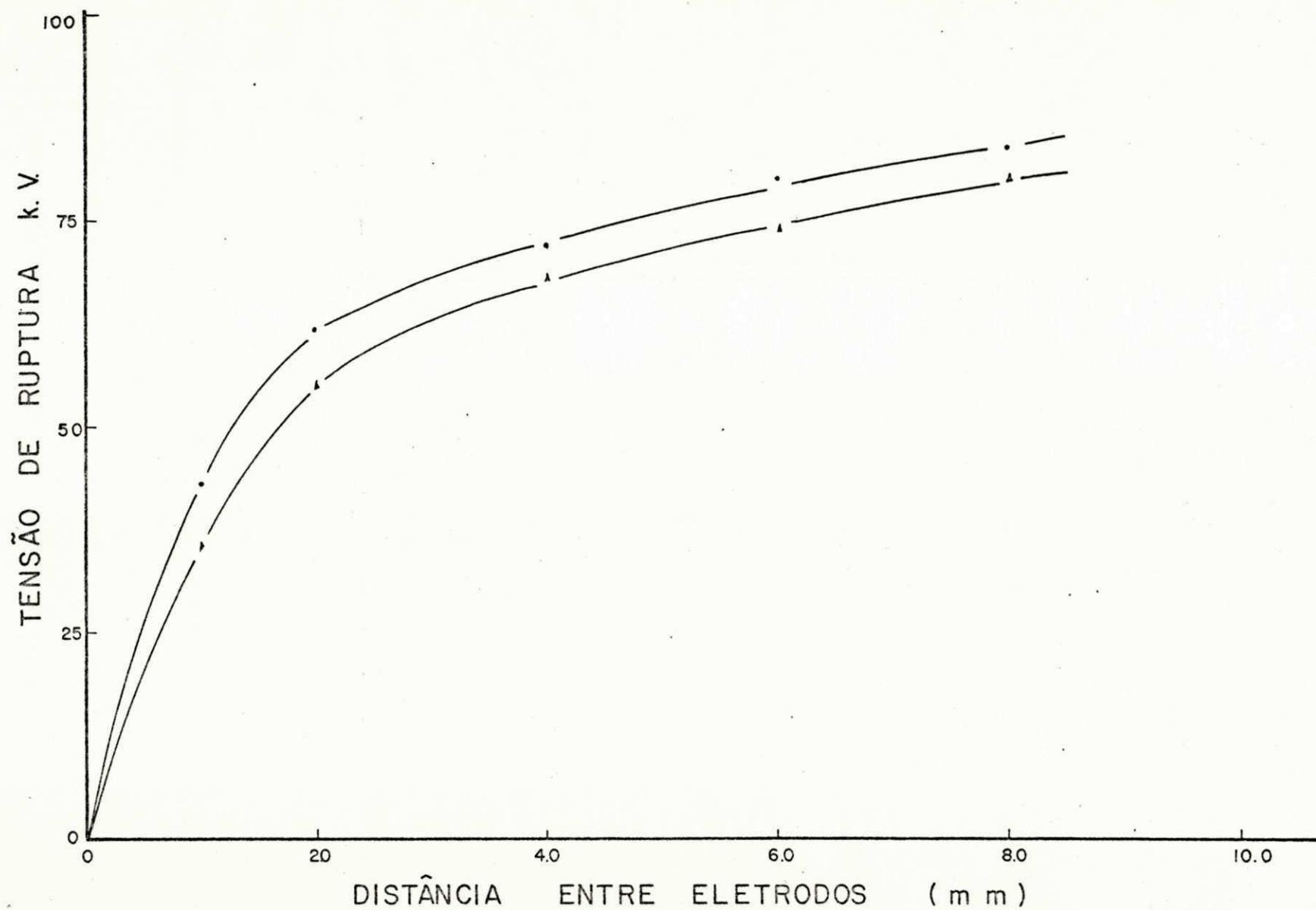


Fig. 4.39 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra positivos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 19 mm de raio - hemisférico.

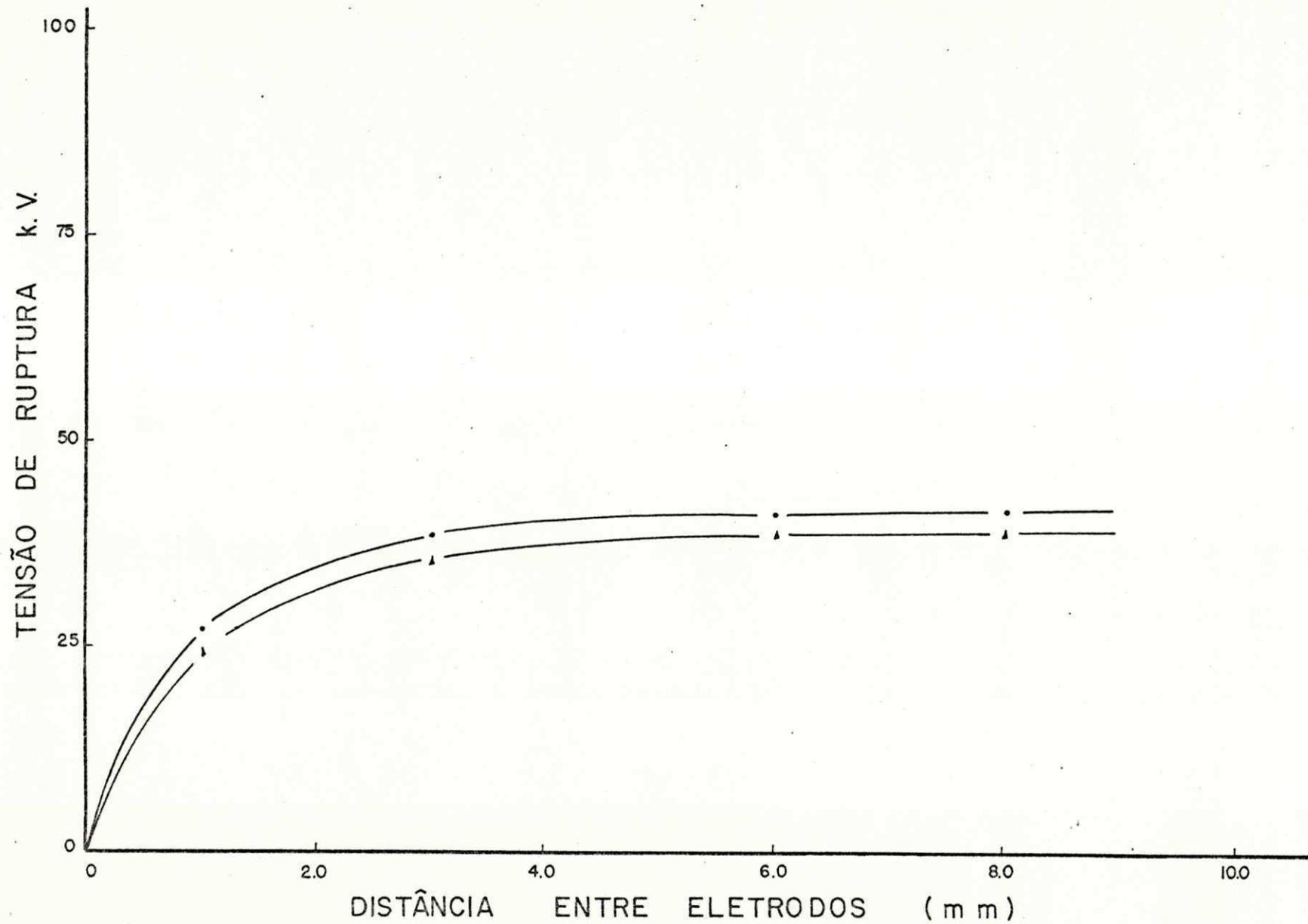


Fig. 4.40 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 0,2 mm de raio - hemisférico.

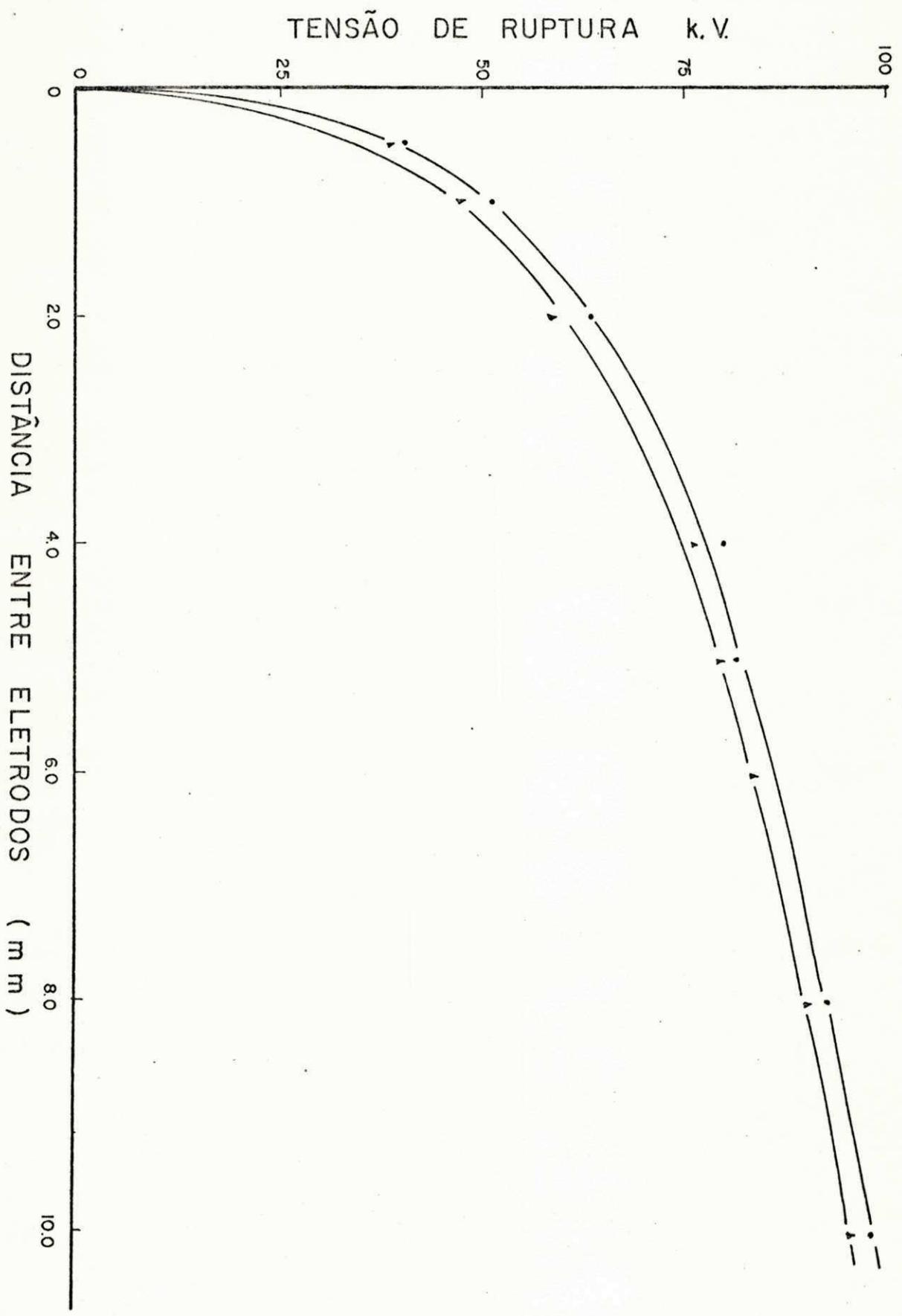


Fig. 4.41 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 1 mm de raio - hemisférico.

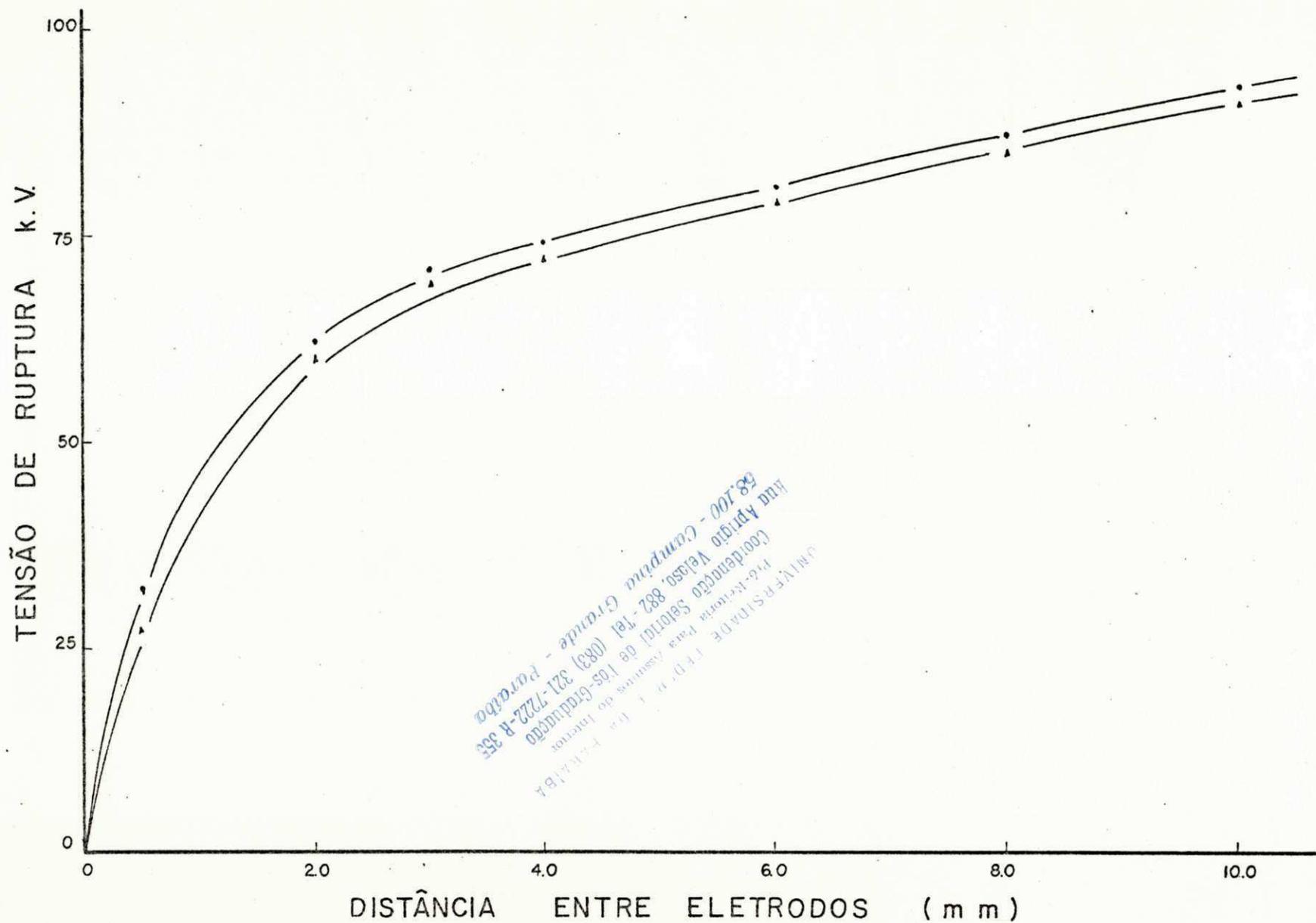


Fig. 4.42 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 5 mm de raio - hemisférico.

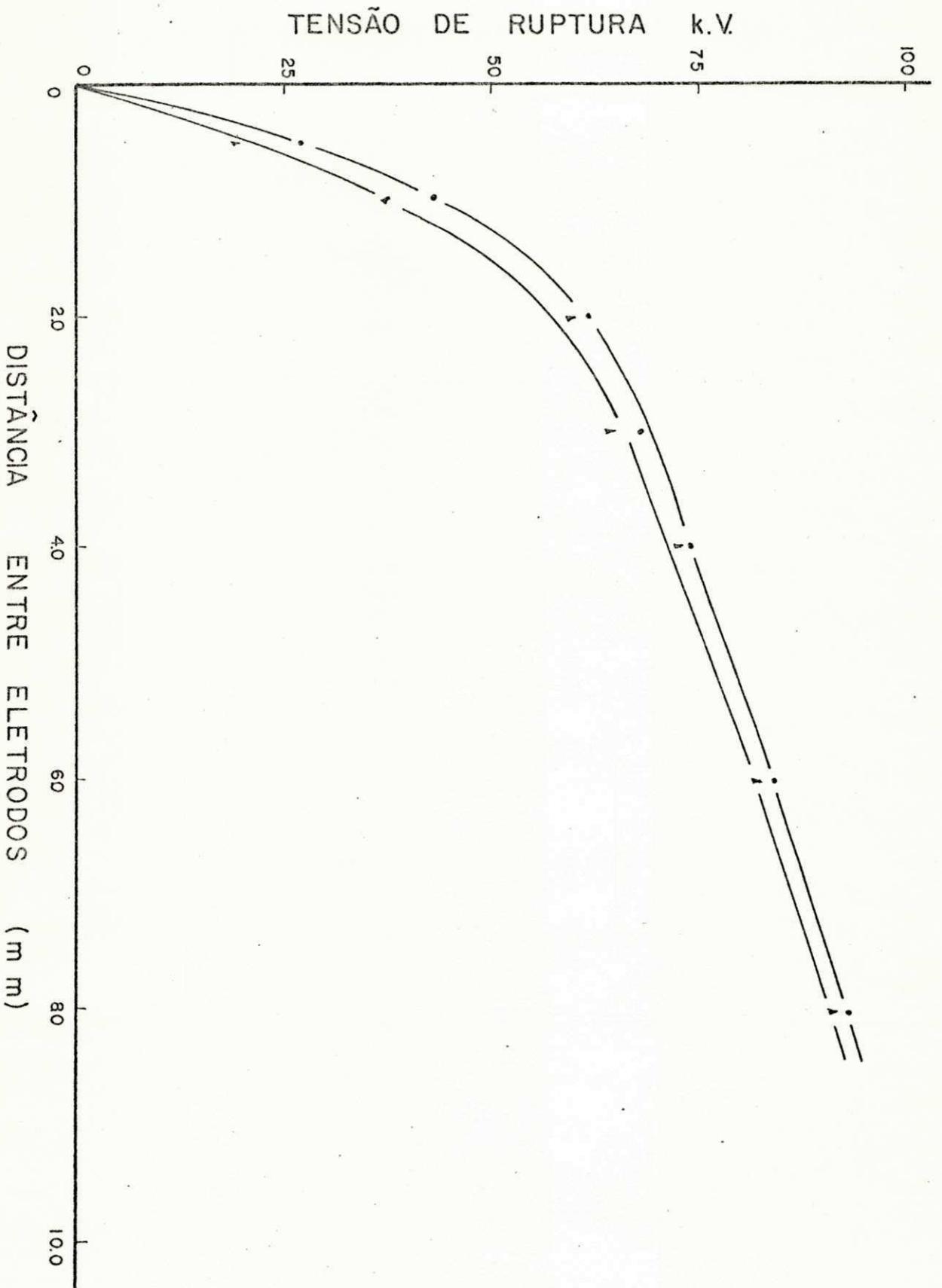


Fig. 4.43 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 15 mm de raio - hemisférico.

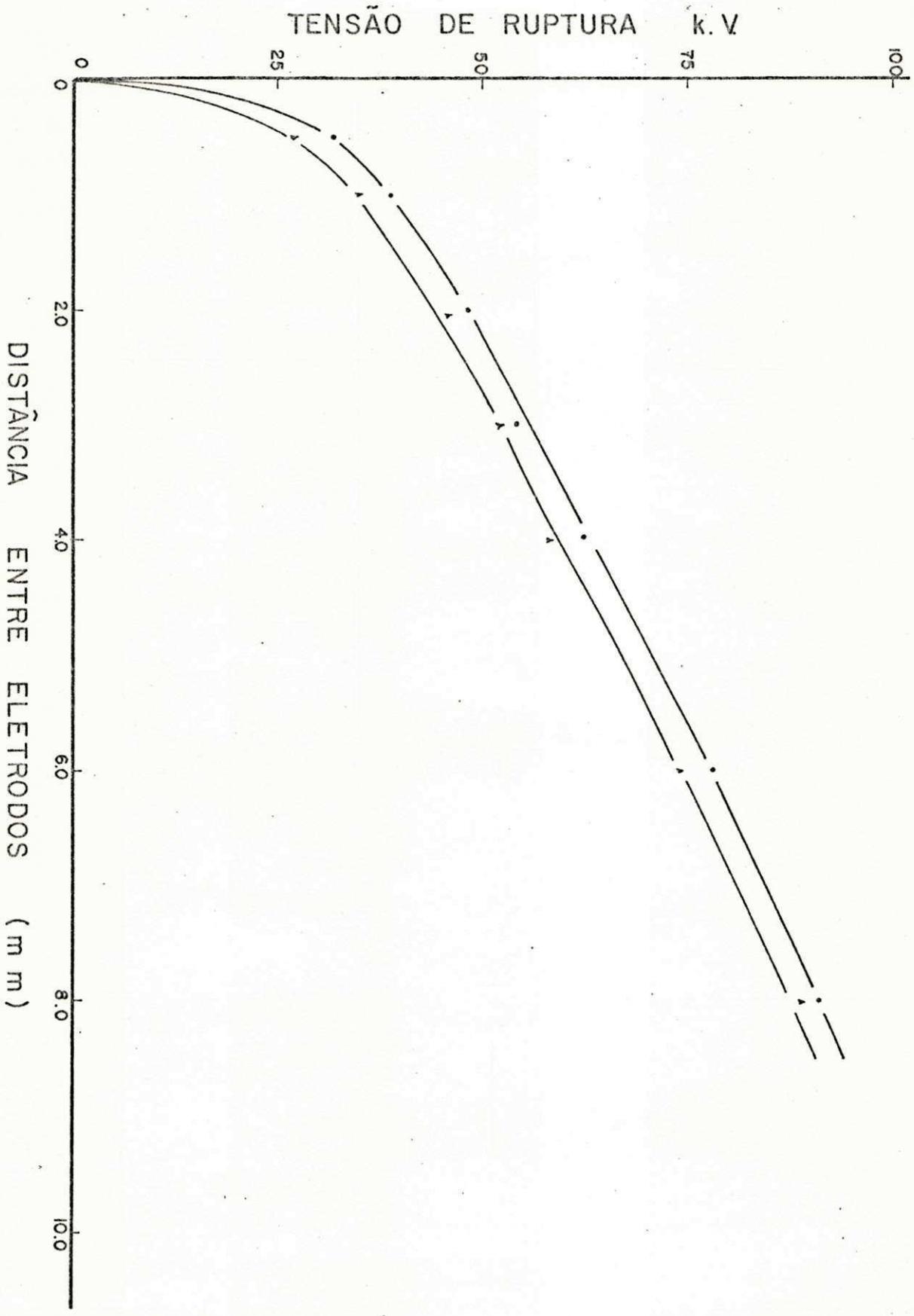


Fig. 4.44
 Faixa de variação da tensão de ruptura para surtos de manobra negativos. Eletrodos de alumínio com 60 mm de diâmetro - plano - e 19 mm de raio - hemisférico.

CAPÍTULO V

OBSERVAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - OBSERVAÇÕES

Durante a efetivação das experiências, o processo de condicionamento dos eletrodos com pequenos raios e distâncias de até 2 mm mostrou-se significativo. Entretanto, devido a sucessivas descargas entre os eletrodos, estes tendenciaram a estragar-se, permanentemente. Também decorrente de várias descargas consecutivas, sem que tivessem ocorrido estragos permanentes, verificamos a presença de gases, liberados por parte dos eletrodos, que causaram uma redução na tensão de ruptura, vindo a restabelecer-se após a paralização, por alguns minutos, para que se processasse o fenômeno de auto-desgaseificação. Quando os estragos nos eletrodos se apresentavam através de pequenas pontas de emissão, suas eliminações foram conseguidas com a aplicação de vários impulsos de diferentes valores.

A forma de descarga entre os eletrodos apresentou-se principalmente sob dois tipos. Para os eletrodos de pequeno raio e com distâncias menores do que 2 mm, geralmente as descargas ocorreram concentradas. Com a utilização de eletrodos de maior raio, também para distâncias maiores, as descargas se processaram distribuídamente na superfície dos eletrodos.

Os valores de tensão contínua de ruptura mostraram sofrer influência da resistência externa (13), bem como a presença do corona demonstrou ser um fator que pode mascarar os resultados; todavia, sua eliminação apresentou-se bastante difícil.

Quando da aplicação de impulsos negativos, para distâncias entre os eletrodos maiores do que 1 mm, os valores da tensão de ruptura tornaram-se bastante confusos para sua determinação, tendo em vista a observação de uma variação aleatória das descargas. Contudo, tal fato já foi presenciado por ocasião da efetivação de experiências semelhantes (20).

Uma vez submetidos aos testes, os eletrodos apresentaram estragos nas suas superfícies, sendo que estes estragos só foram presenciados no anodo, tanto para impulsos atmosféricos como surtos de manobra, polaridades positiva e negativa.

5.2 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos com tensão contínua mostraram pequena diferença comparados aos de Schmidt (22). No entanto, se levarmos em consideração a composição química dos materiais dos

eletrodos, um certo grau de imperfeição nas suas configurações, principalmente na hemisfericidade e no polimento, e o método utilizado na fixação das distâncias entre os eletrodos, veremos que estes fatores podem ter sido os responsáveis fundamentais por tal diferença.

Para os pares de eletrodos submetidos a impulsos atmosféricos de polaridades positiva e negativa, suas tensões máximas de ruptura diferiram um pouco das obtidas com pares de eletrodos sujeitos apenas a impulsos de mesma polaridade. Experiências bem definidas, neste aspecto, devem efetivar-se; entretanto, a influência no processo de condicionamento dos eletrodos para impulsos de polaridades positiva e negativa e a possibilidade de estragos nos eletrodos, decorrente de várias descargas, podem ser levadas em consideração.

Analisando-se os resultados apresentados na terceira e quarta séries do Capítulo anterior, observamos que os valores de tensão máxima de ruptura para impulsos atmosféricos, polaridade positiva, são maiores do que os de surtos de manobra e, à medida que se diminui o raio do eletrodo hemisférico, obtêm-se crescentes tensões de ruptura. Levando-se em consideração que o catodo se apresenta como principal eletrodo no mecanismo de ruptura, tal fato pode ser visto como uma limitação das pontas de emissão, já que, ao se reduzir o raio do eletrodo, a distribuição de campo elétrico no catodo - plano, torna-se cada vez mais concentrada. Como a duração dos impulsos atmosféricos é bem menor do que a dos surtos de manobra, as diferenças mostradas nas tensões de ruptura atribui-se serem dependentes da corrente de emissão

de campo com a duração dos impulsos, intensificando-se, à proporção que se aumenta o tempo de duração destes, ou mesmo devido ao processo de emissão de gases, limitado, também, por este tempo.

Comparando-se as tensões de ruptura, impulsos atmosféricos, com as de Schmidt (22), contínuas, ambas mostraram a mesma tendência: os valores com polaridade positiva expõem-se acima dos negativos, para eletrodos hemisféricos de pequeno raio. Quanto ao mecanismo de ruptura, para pequenas distâncias entre os eletrodos, a hipótese do feixe de elétrons apresentou-se como a mais provável, devido às suas características de descarga, adicionando, também, o fato de que o anodo sempre se mostrava estragado, suposto ser decorrente do bombardeamento de elétrons emitidos pelo catodo, ilustrado na Fig. 5.1.

Com impulsos atmosféricos e surtos de manobra, de polaridade negativa, as tensões de ruptura tiveram uma variação bastante significativa com o aumento da distância e a diminuição do raio dos eletrodos hemisféricos. Caracterizado o fenômeno de ruptura através do mecanismo do micro-partículas, estas poderiam ter sofrido a influência de suas inércias, dependendo das dimensões, dificultando assim o choque com o catodo, quando o seu raio é suficientemente pequeno e as distâncias entre os eletrodos são grandes.

Para uma determinada condição ambiental e um dado material dos eletrodos, a possibilidade da existência de dois parâmetros críticos, campo máximo e área efetiva, para cada eletrodo, foi levantada por Miller (19), ao discutir a influência das suas curvaturas. No intento de verificar a influência destes do

is parâmetros, fizemos uma análise prática dos resultados. Na de terminação do campo elétrico sobre a superfície dos eletrodos, utilizamos o método das imagens, onde o campo no eletrodo hemisférico, mostrado na Fig. 5.2, é dado por:

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{ab \sinh \alpha \cos \gamma}{r_{1n}^2 \{b \sinh n\alpha + a \sinh(n-1)\alpha\}} + \frac{ab \sinh \alpha \cos \psi}{r_{2n}^2 c \sinh n\alpha} \right]$$

onde

$$\alpha = \cosh^{-1} \{(c^2 - a^2 - b^2)/2ab\}$$

Variando-se o raio dos eletrodos hemisféricos bem como suas distâncias, obtivemos, através de um Computador IBM 370, diversas distribuições de campo, tanto no plano como no hemisfério, cujos gráficos são mostrados nas Figs. 5.3 a 5.10. Em seguida, utilizamo-los junto aos de tensão de ruptura para a determinação do campo máximo de ruptura em função da distância, sob determinadas condições, como mostram as Figs. 5.11 a 5.13.

A área efetiva dos eletrodos, para a configuração hemisfério-plano, foi arbitrariamente definida como a área sobre a qual o campo elétrico não varia mais do que -5% do seu valor máximo. Decorrente dos gráficos acima, determinamo-la no plano e no hemisfério $\{S = 2\pi r^2(1 - \cos\theta)\}$, mostrado nas Figs. 5.14 e 5.15.

Analisando-se os gráficos, vemos que, para os eletrodos hemisféricos de raio maior ou igual a 5 mm, o decaimento do campo máximo de ruptura, com o crescimento da distância entre os

eletrodos, para impulsos atmosféricos, é mais acentuado do que para surtos de manobra, além de situar-se acima. Também para surtos de manobra, o campo máximo de ruptura, no catodo, com pequenas distâncias, mostra-se praticamente o mesmo, o que vem sedimentar nossa hipótese do feixe de elétrons como principal responsável pela ruptura. As pequenas diferenças podem ser atribuídas a diversos fatores, tais como, método de fixação da distância, polimento e outros citados acima.

Para os eletrodos de pequeno raio, o campo máximo de ruptura no catodo, com polaridade negativa, apresenta-se acima do positivo, para pequenas distâncias. Os resultados obtidos por Schmidt (22), Fig. 5.16, mostram igual comportamento para tensões contínuas. Entretanto, devido ao controle de qualidade no polimento das superfícies dos eletrodos não ter sido suficientemente adequado, comparado às suas dimensões, bem como as limitações do método das imagens, para eletrodos bastante finos, preferimos não nos estender em comentários mais aprofundados.

Para os eletrodos de grande raio, o crescimento visto nas suas áreas efetivas pode ser praticamente responsável pelo decréscimo do campo máximo de ruptura. Quanto ao mecanismo de ruptura, alguns trabalhos (22,20) têm sugerido a hipótese micro-partículas como principal causadora da ruptura, para grandes distâncias. Contudo, a área do eletrodo apresenta-se influente na tensão de ruptura.

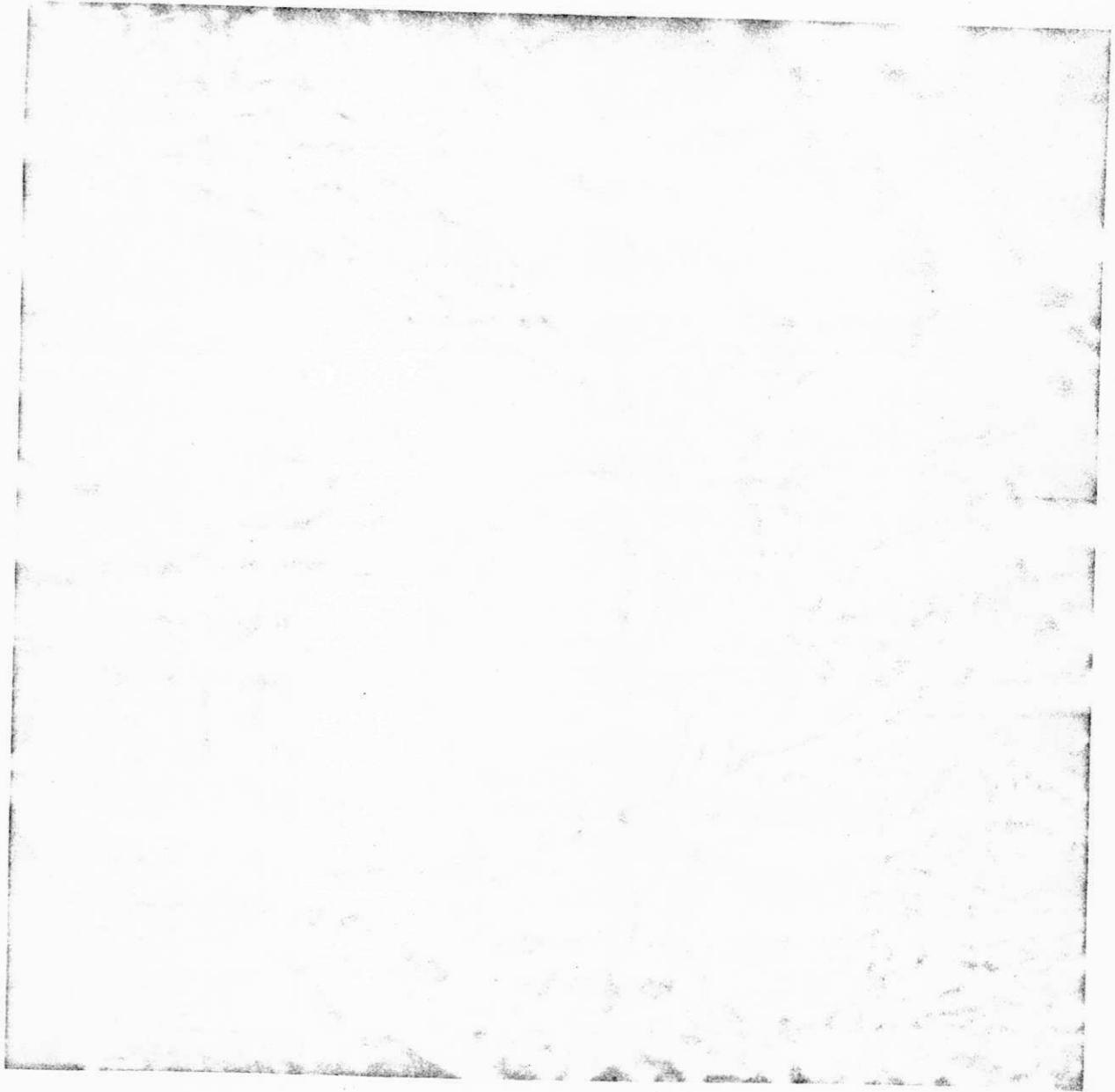


Fig. 5.1 Superfície de um eletrodo (anodo) de bronze após os testes (objetiva - 50 e ocular - 10).

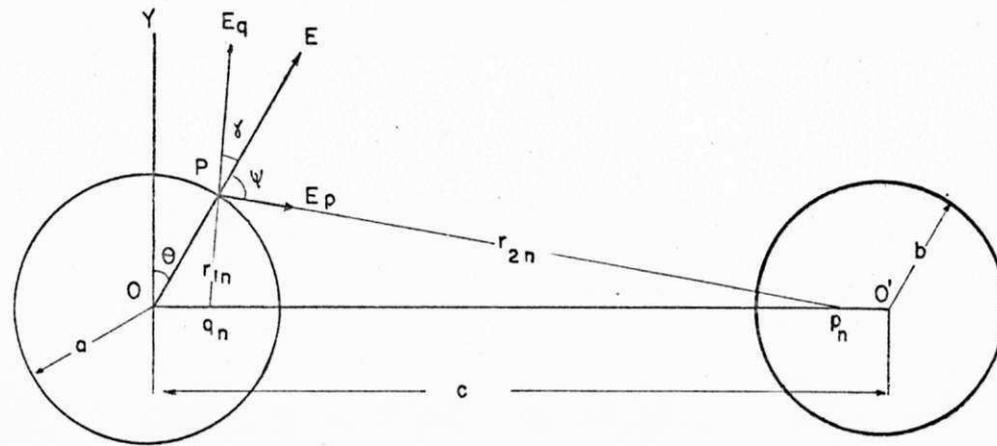


Fig. 5.2 Campo elétrico - método das imagens.

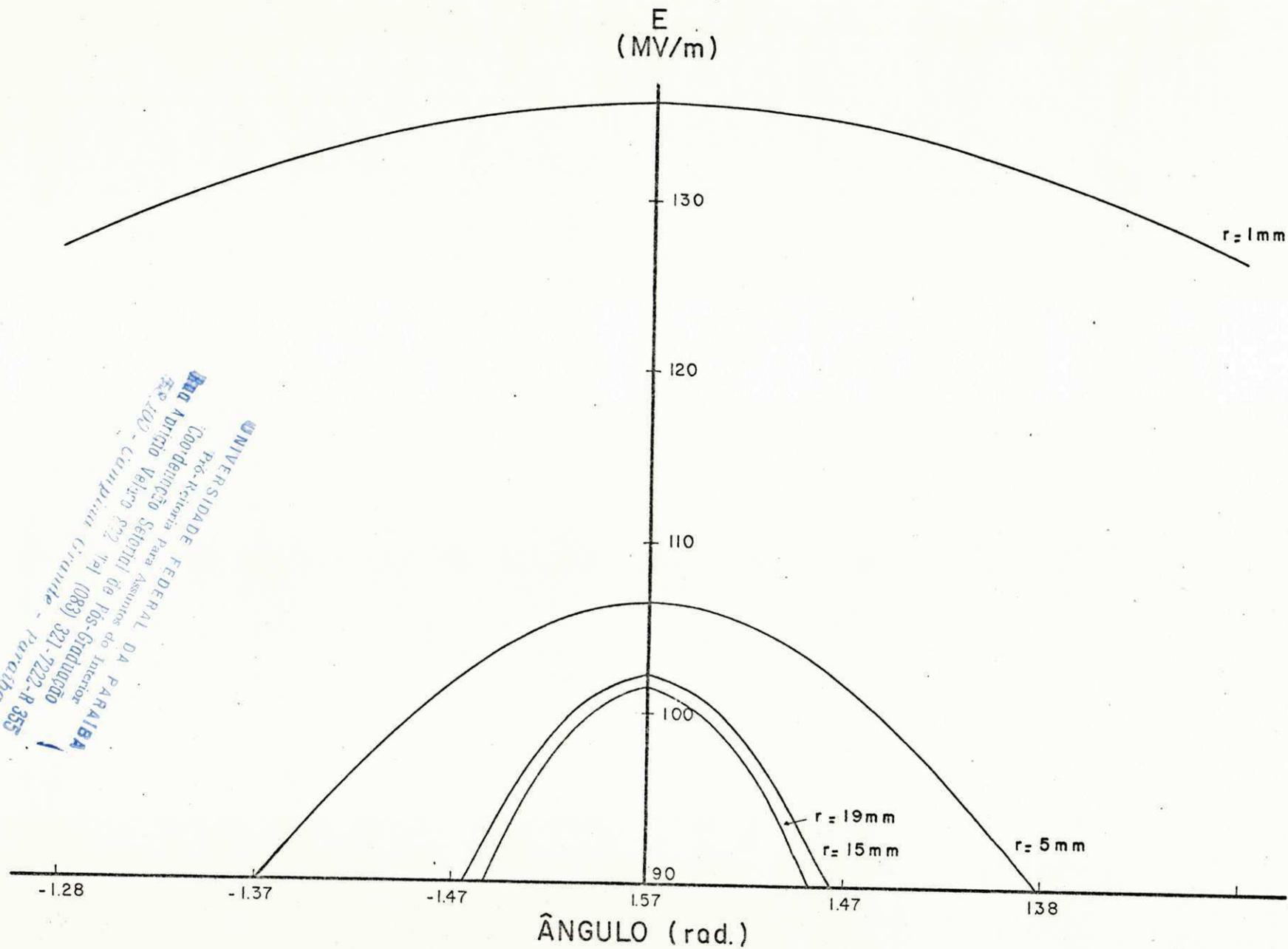


Fig 5.3 Campo elêtrico na superfície do eletrodo hemisférico
($V = 50 \text{ kV}$ e $d = 0,5 \text{ mm}$).

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Pró-Reitoria para Assuntos do Interior
 Coordenação de Pós-Graduação
 Rua Adriano Veloso 372-191 (083) 321-7222-R-355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

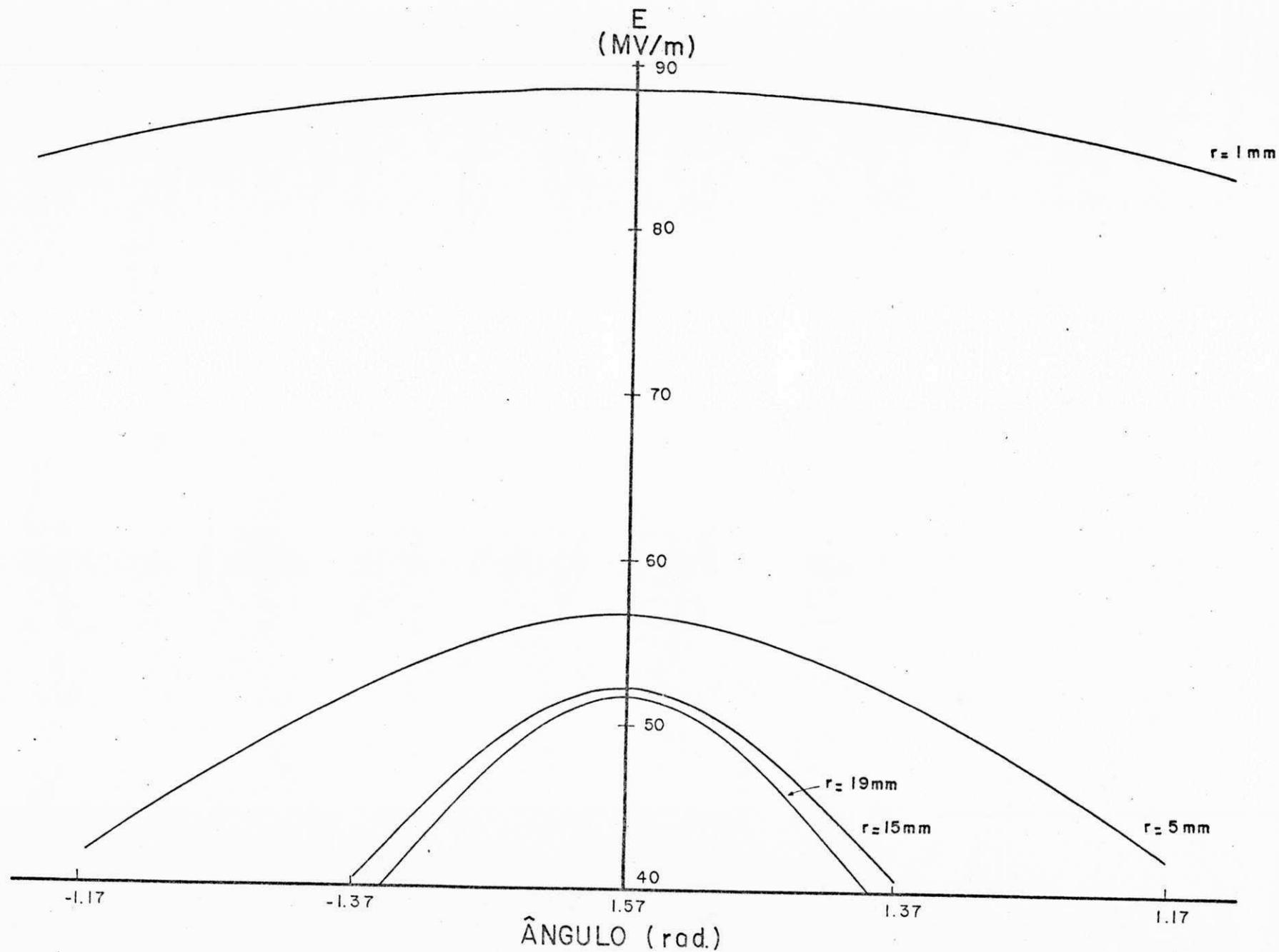


Fig. 5.4 Campo elétrico na superfície do eletrodo hemisférico ($V = 50\text{ kV}$ e $d = 1,0\text{ mm}$).

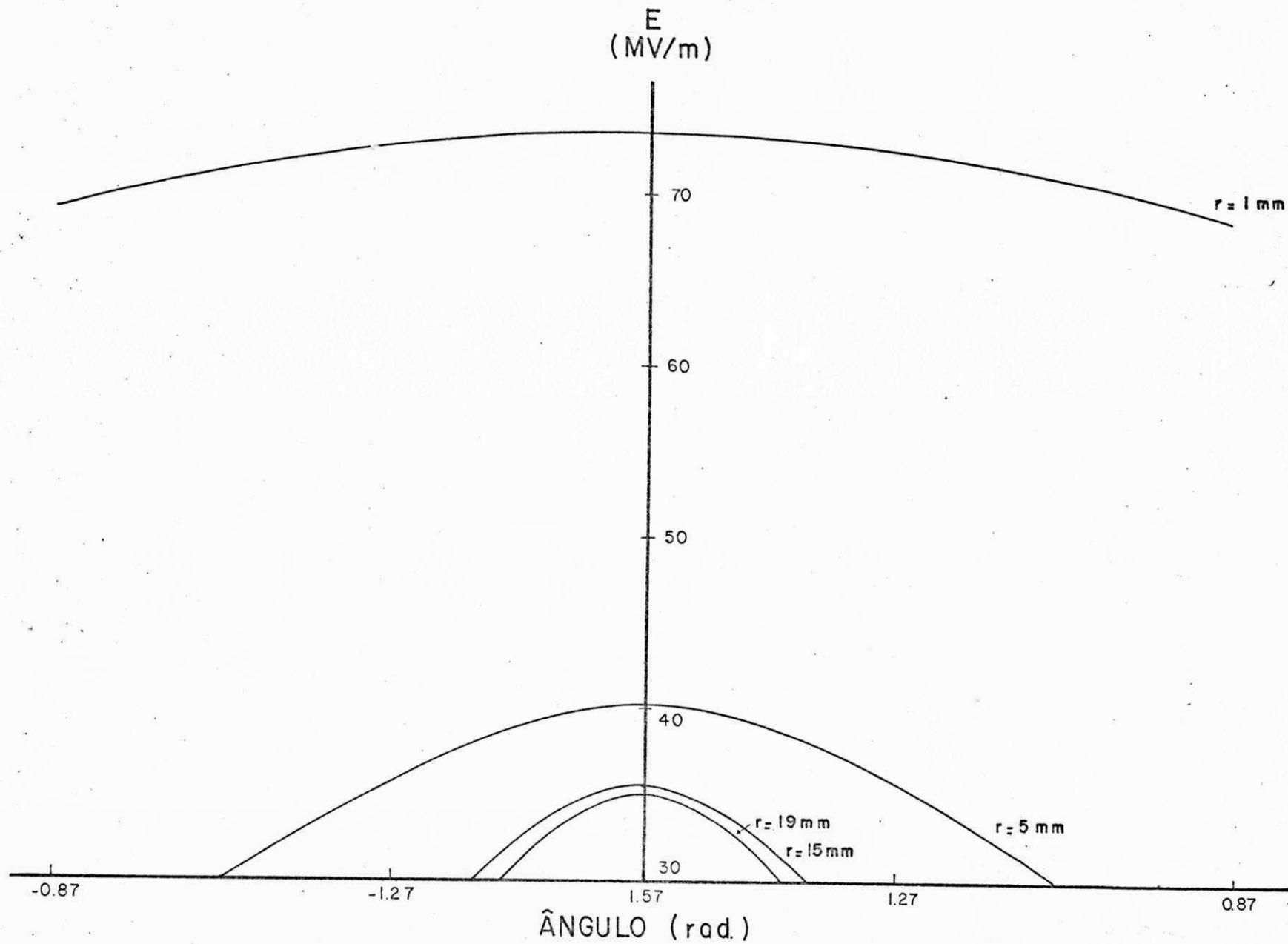


Fig. 5.5 Campo elétrico na superfície do eletrodo hemisférico
($V = 50\text{ kV}$ e $d = 1,5\text{ mm}$).

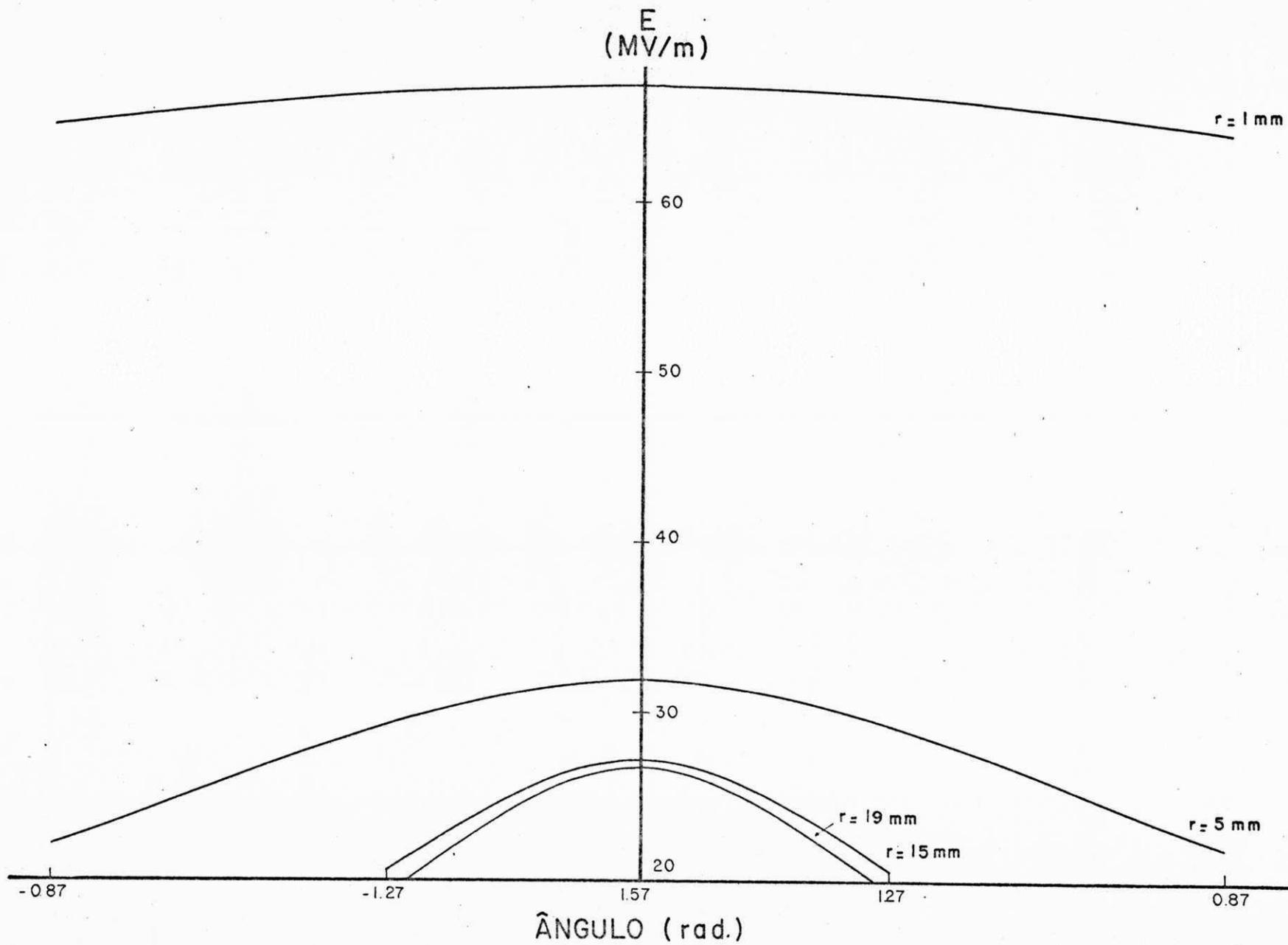


Fig. 5.6 Campo elêtrico na superfície do eletrodo hemisférico ($V = 50 \text{ kV}$ e $d = 2,0 \text{ mm}$).

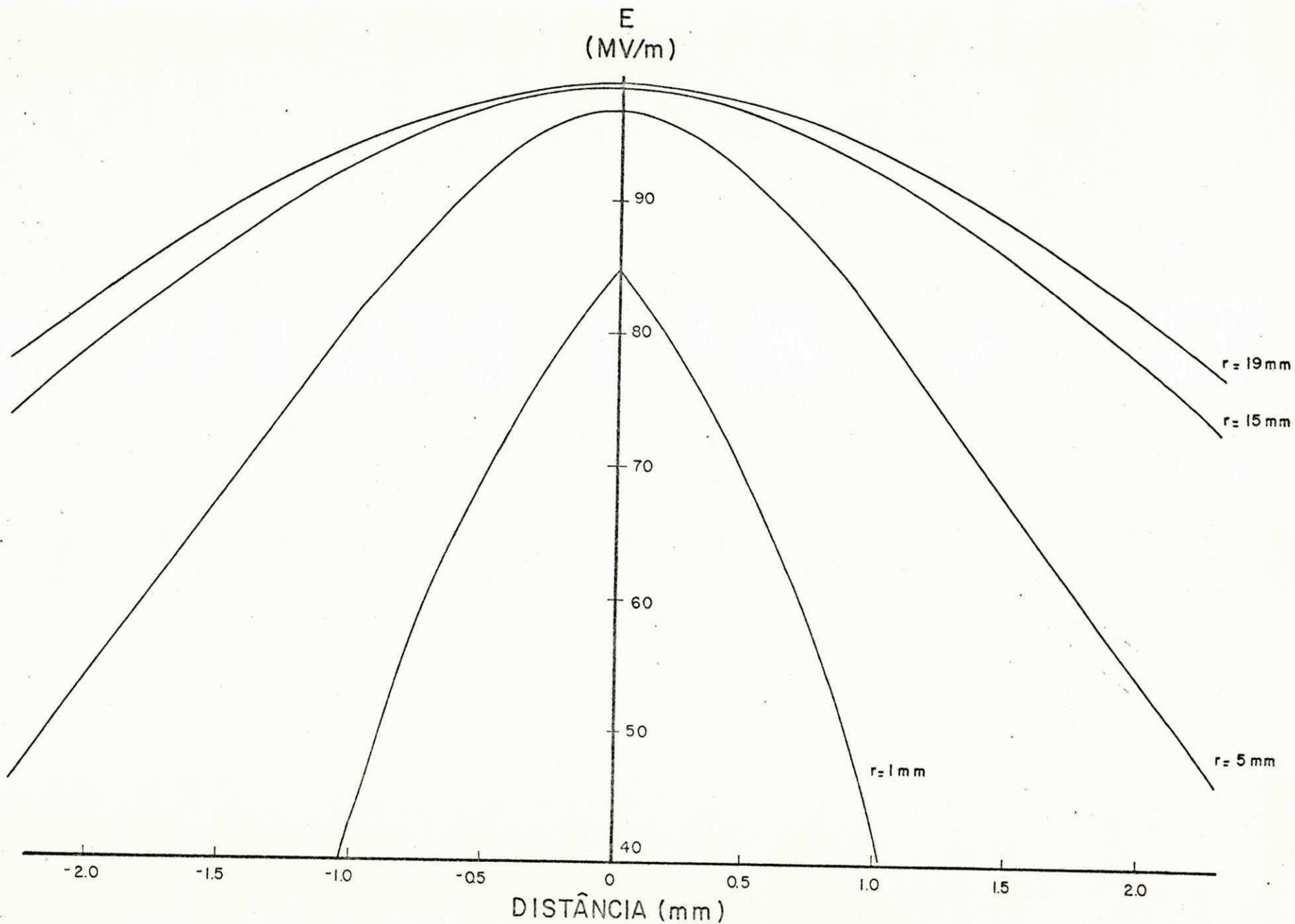


Fig. 5.7 Campo elêtrico na superfície do eletrodo plano
($V = 50 \text{ kV}$ e $d = 0,5 \text{ mm}$).

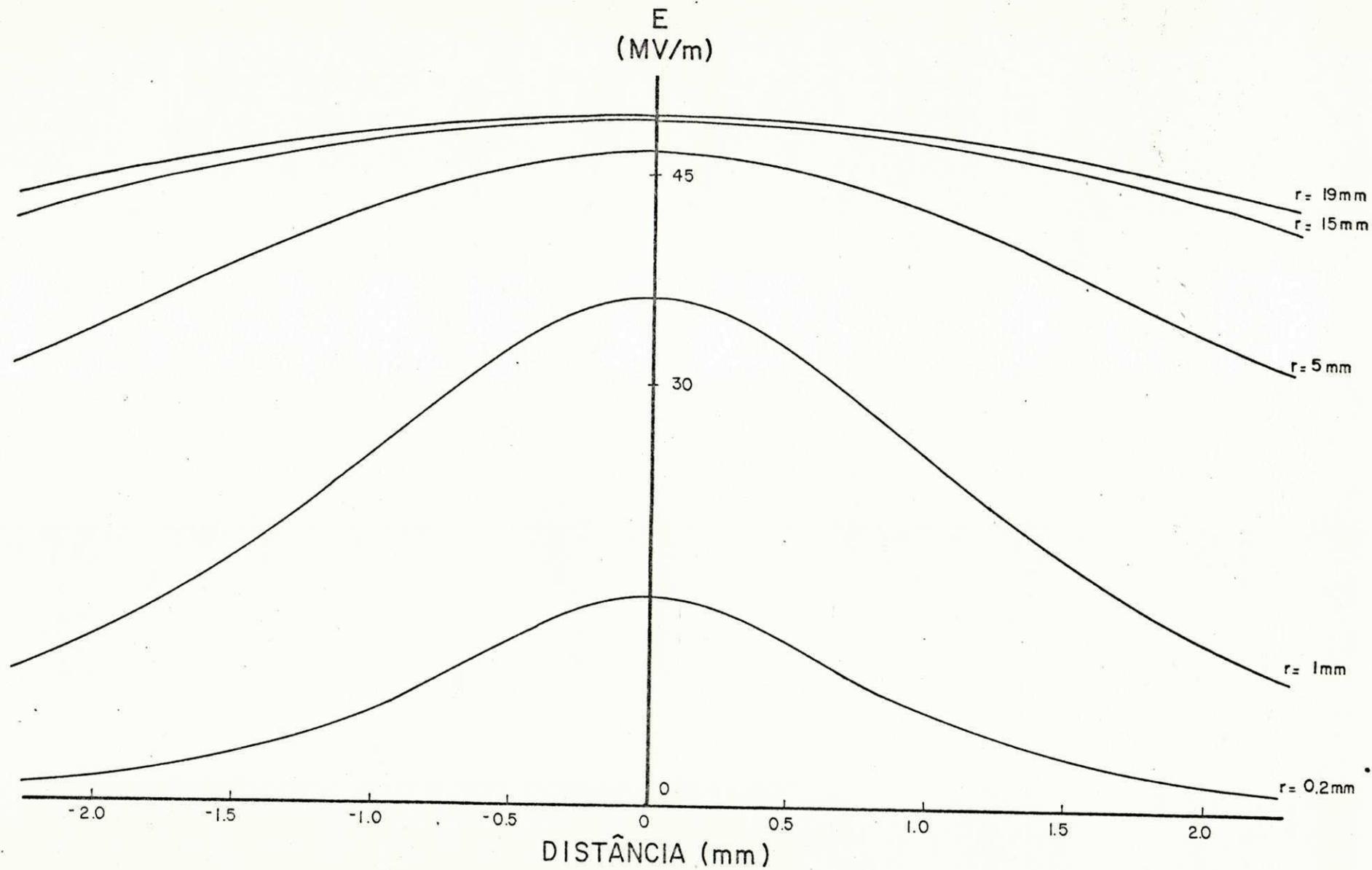


Fig. 5.8 Campo el̄trico na superf̄cie do eletrodo plano ($V = 50 \text{ kV}$ e $d = 1,0 \text{ mm}$).

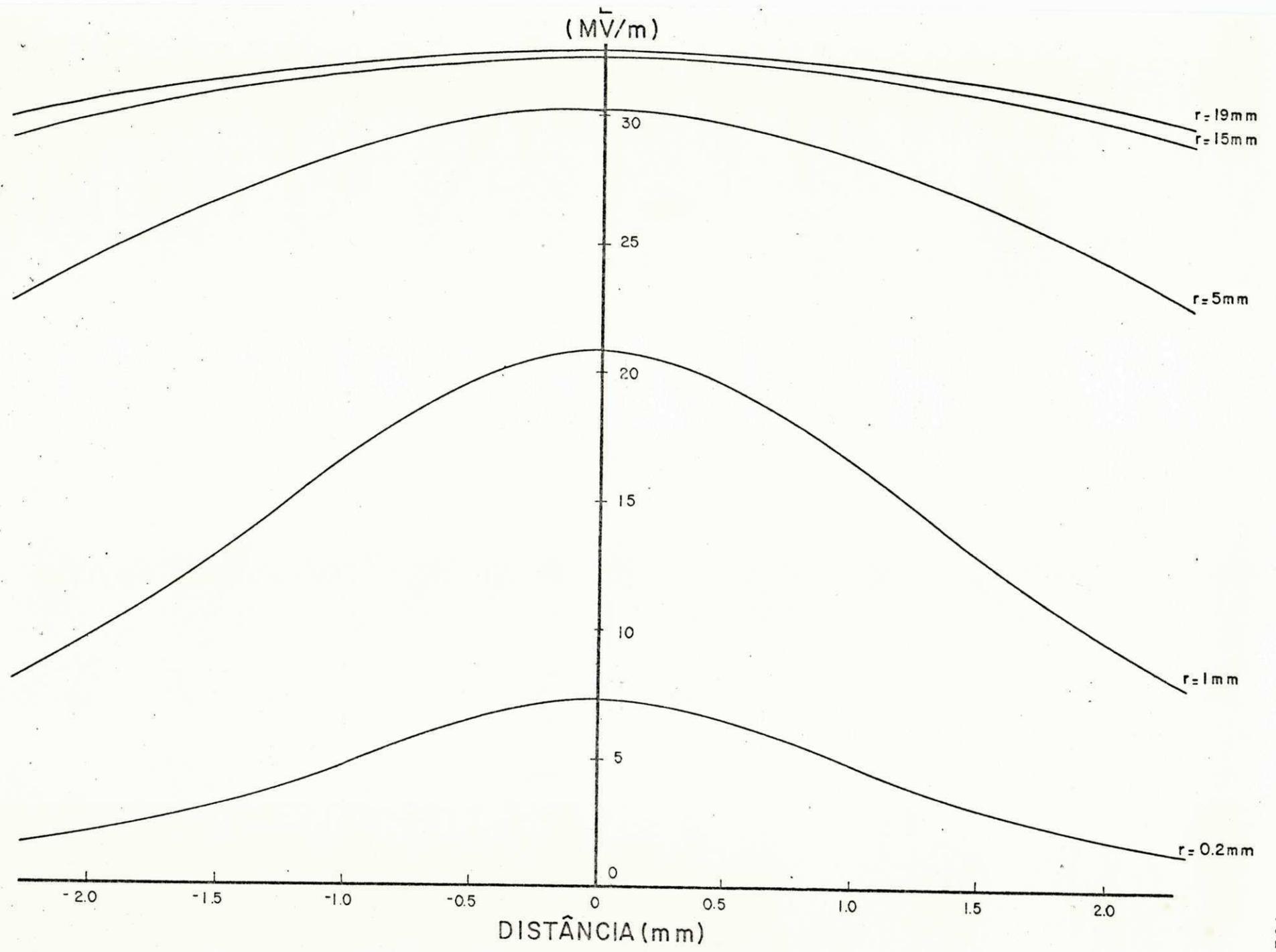


Fig. 5.9 Campo elétrico na superfície do eletrodo plano
 ($V = 50\text{ kV}$ e $d = 1,5\text{ mm}$).

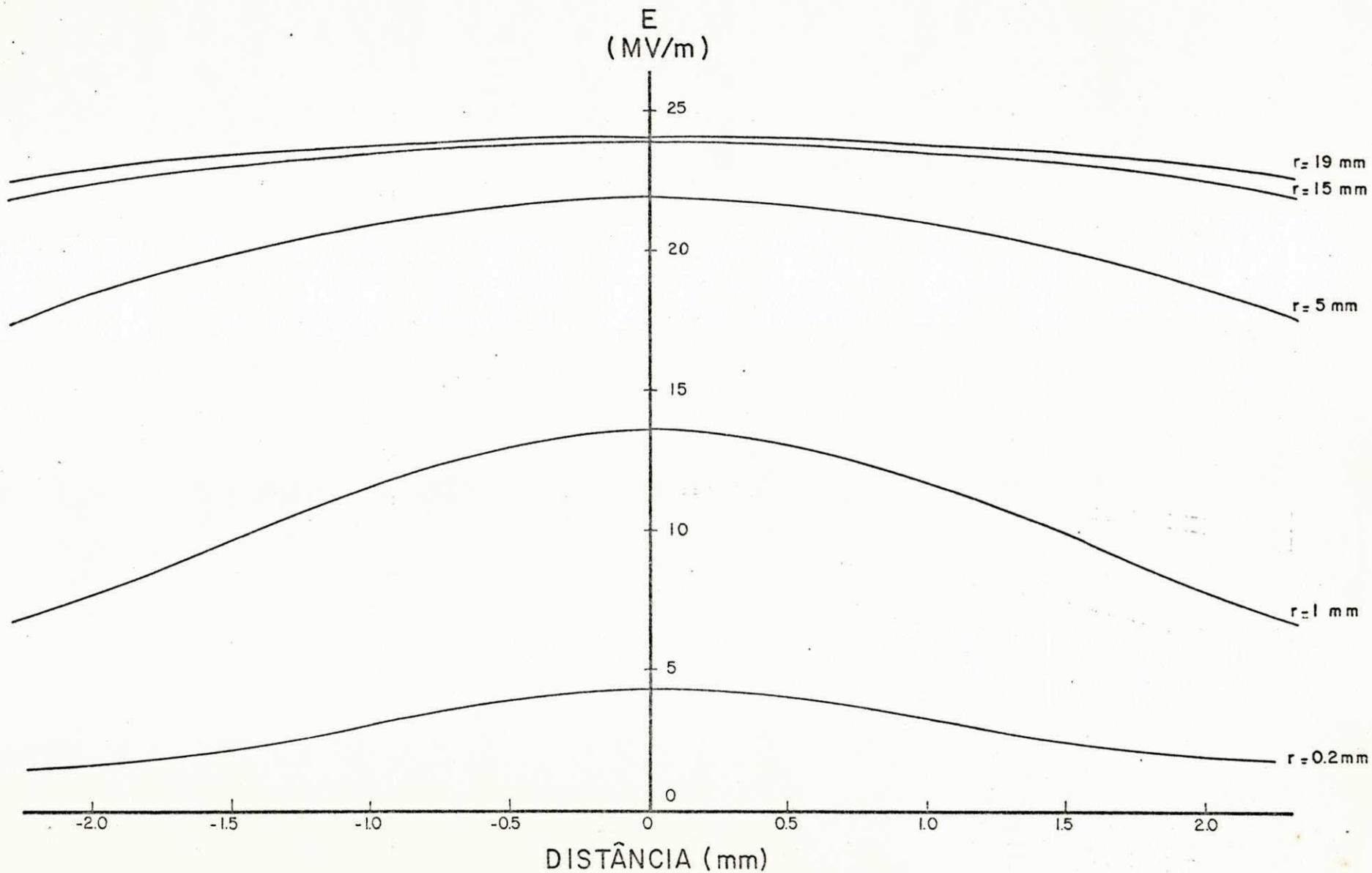


Fig. 5.10 Campo elétrico na superfície do eletrodo plano
($V = 50$ kV e $d = 2,0$ mm).

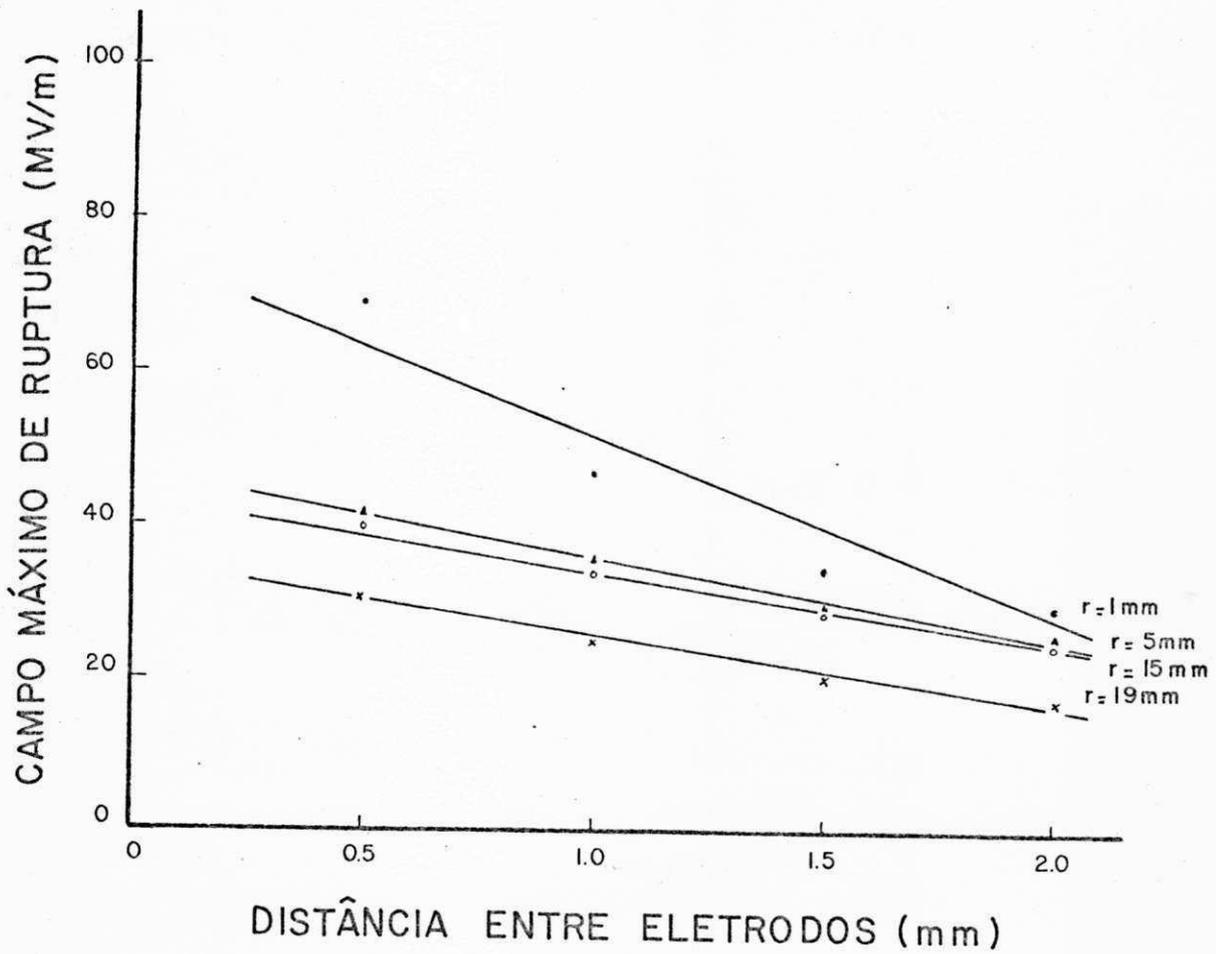


Fig. 5.11 Campo máximo de ruptura para surtos de manobra positivo. Eletrodos de bronze.

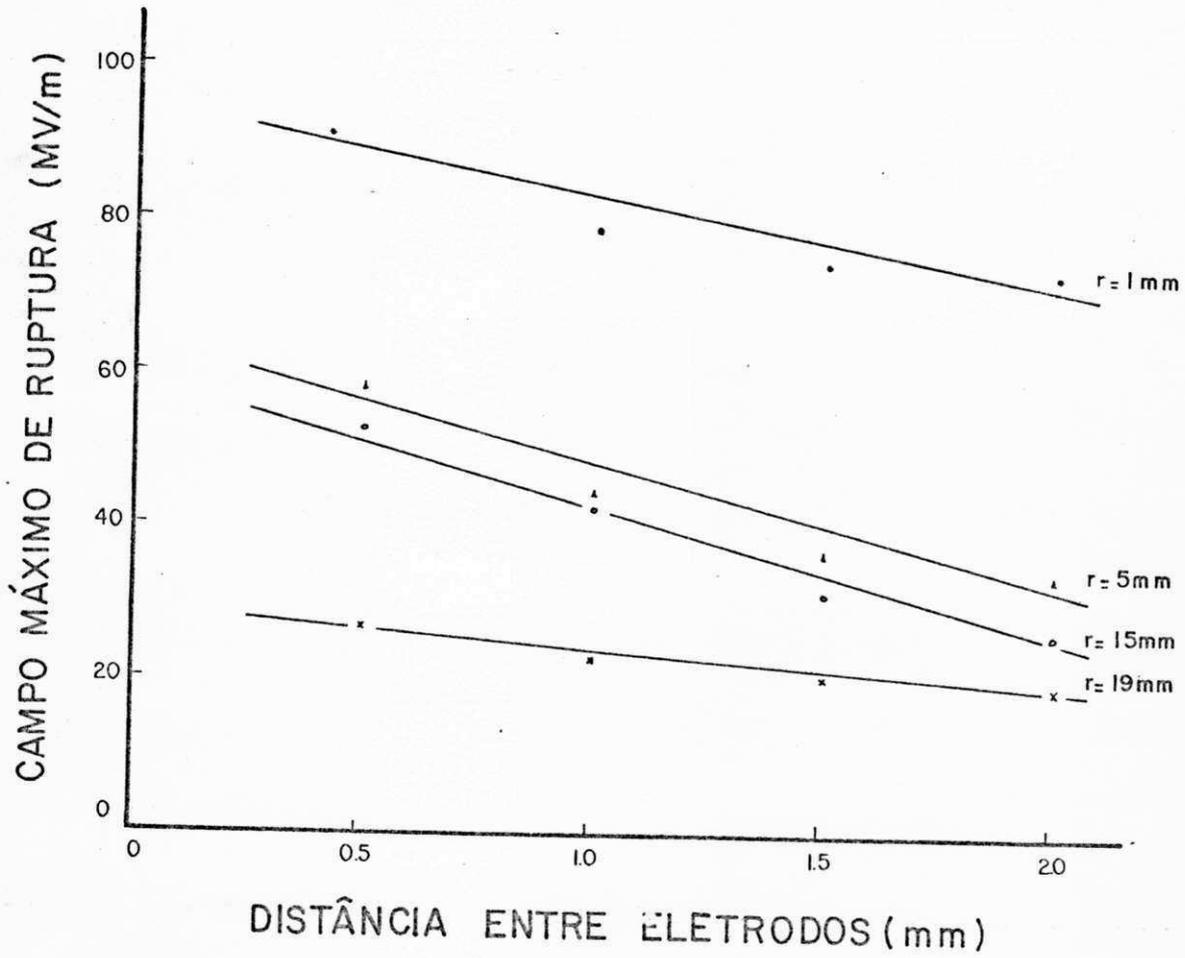


Fig. 5.12 Campo máximo de ruptura para surtos de manobra negativo. Eletrodos de bronze.

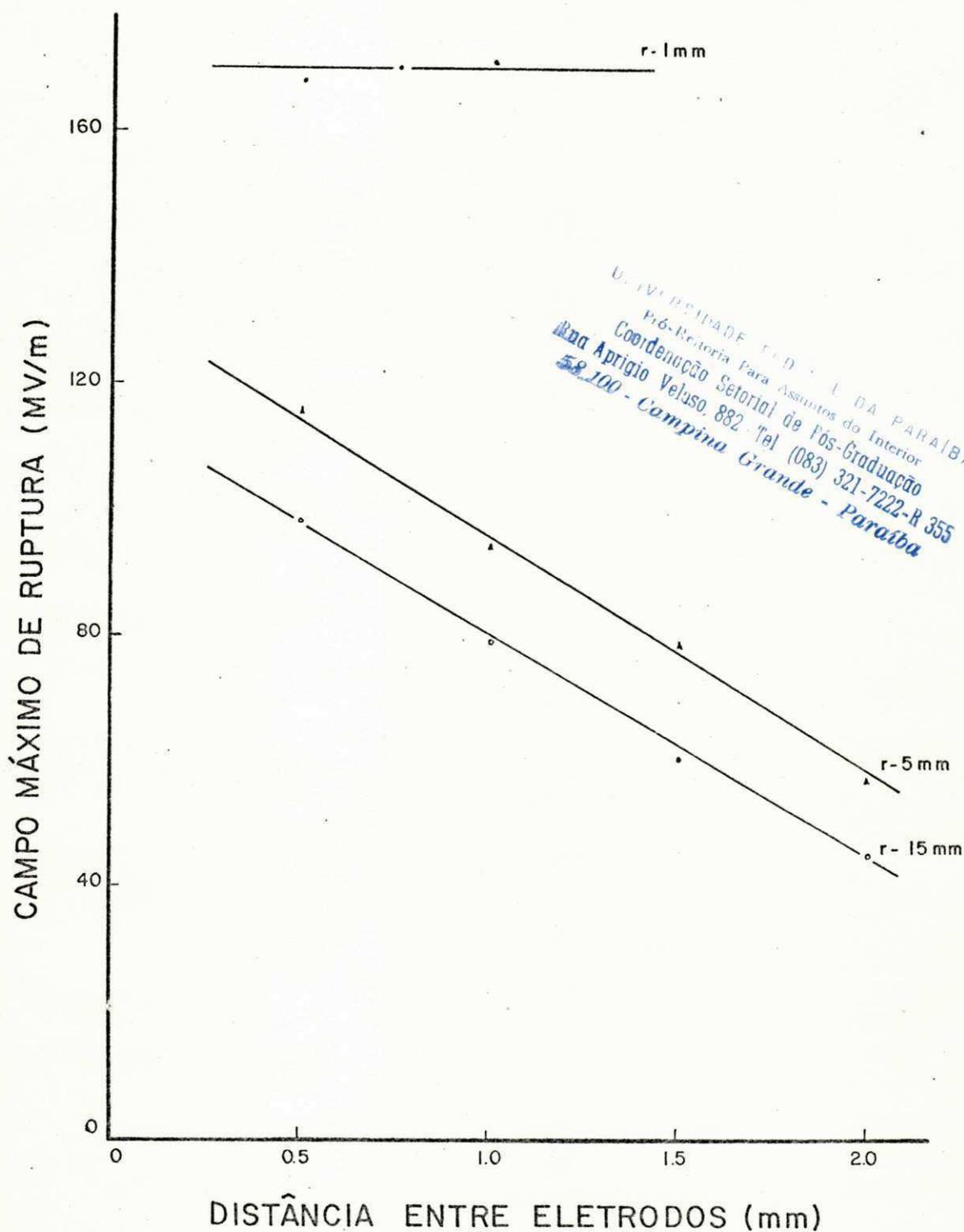


Fig. 5.13 Campo máximo de ruptura para impulsos atmosféricos negativos. Eletrodos de bronze.

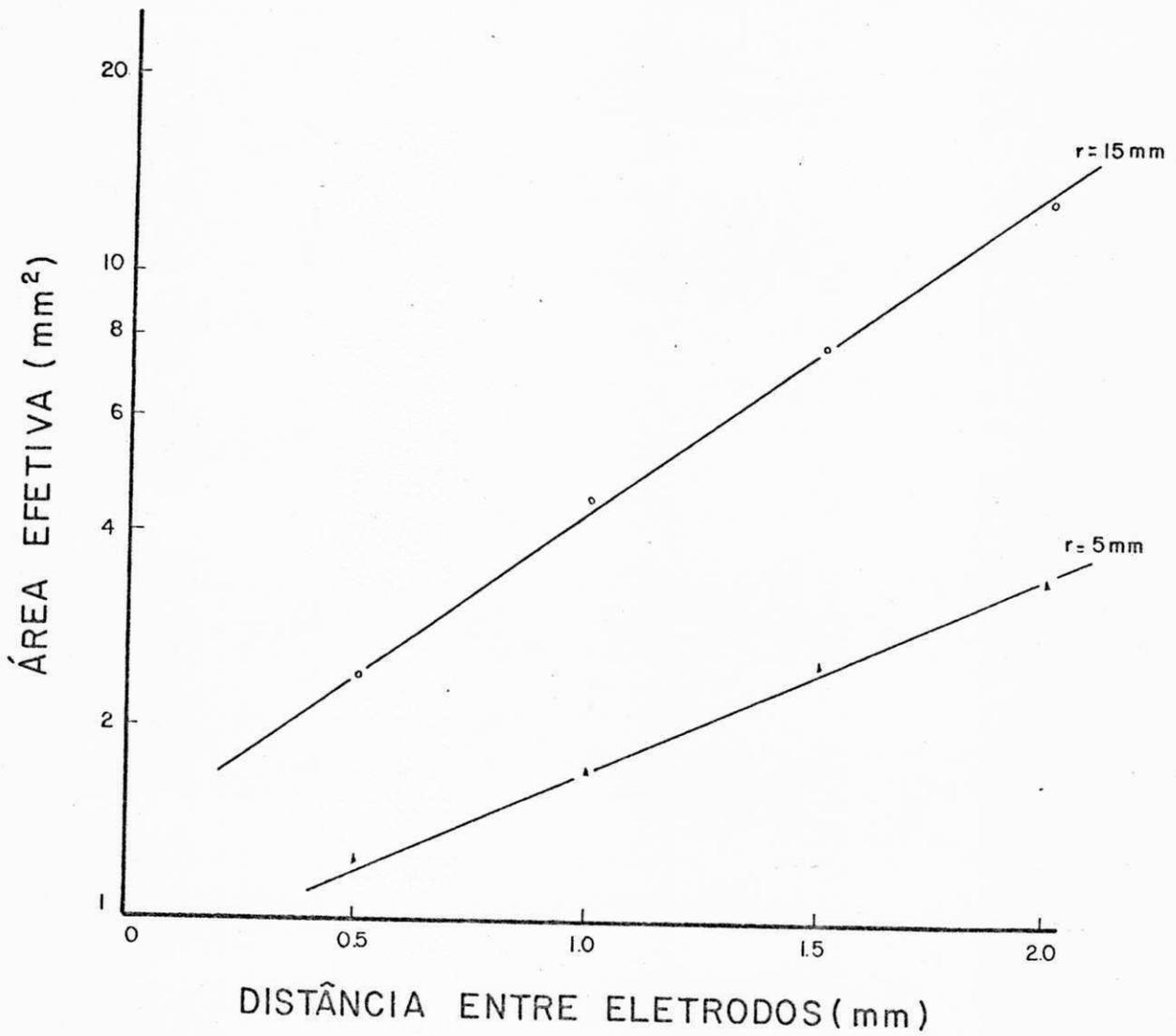


Fig. 5.14 Área efetiva do eletrodo plano.

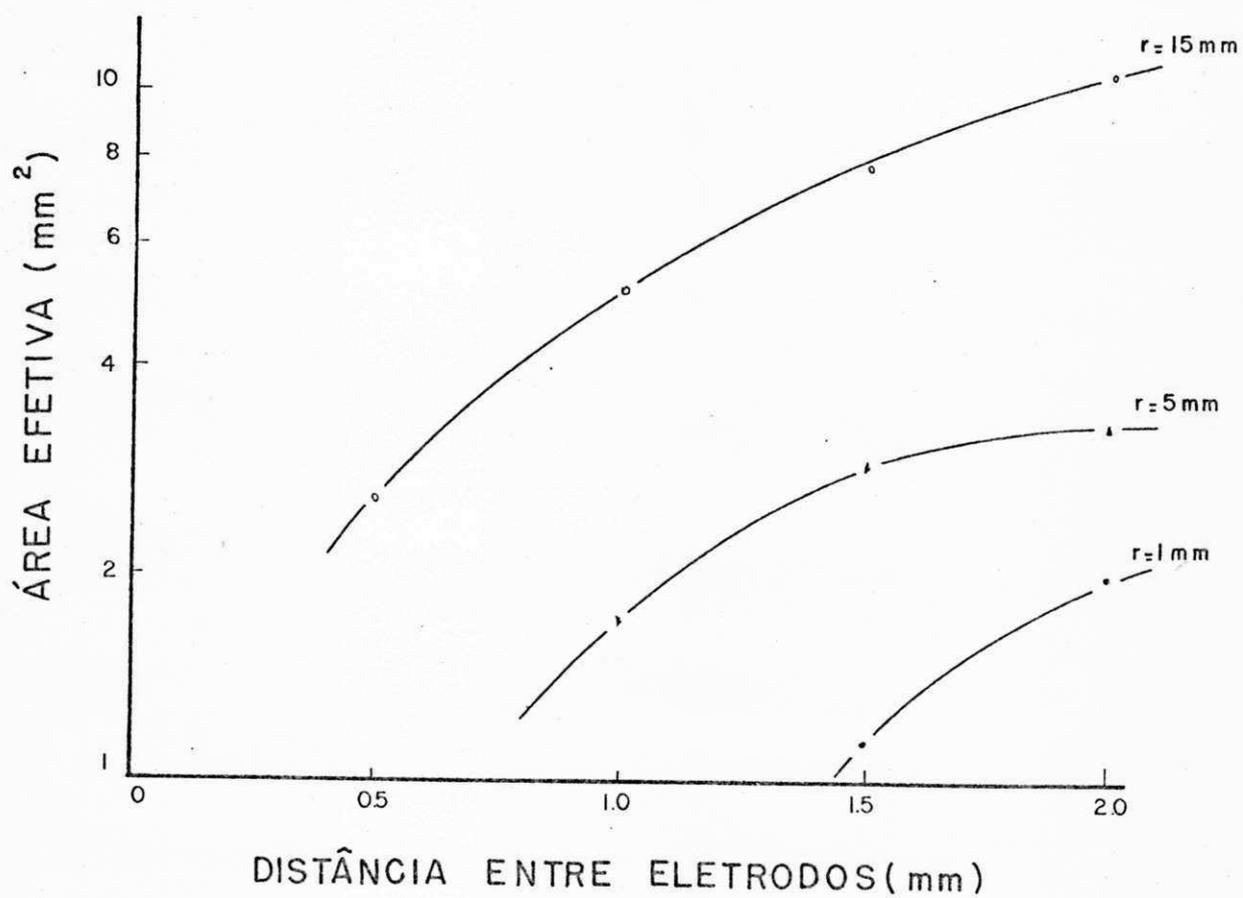


Fig. 5.15 Área efetiva do eletrodo hemisférico.

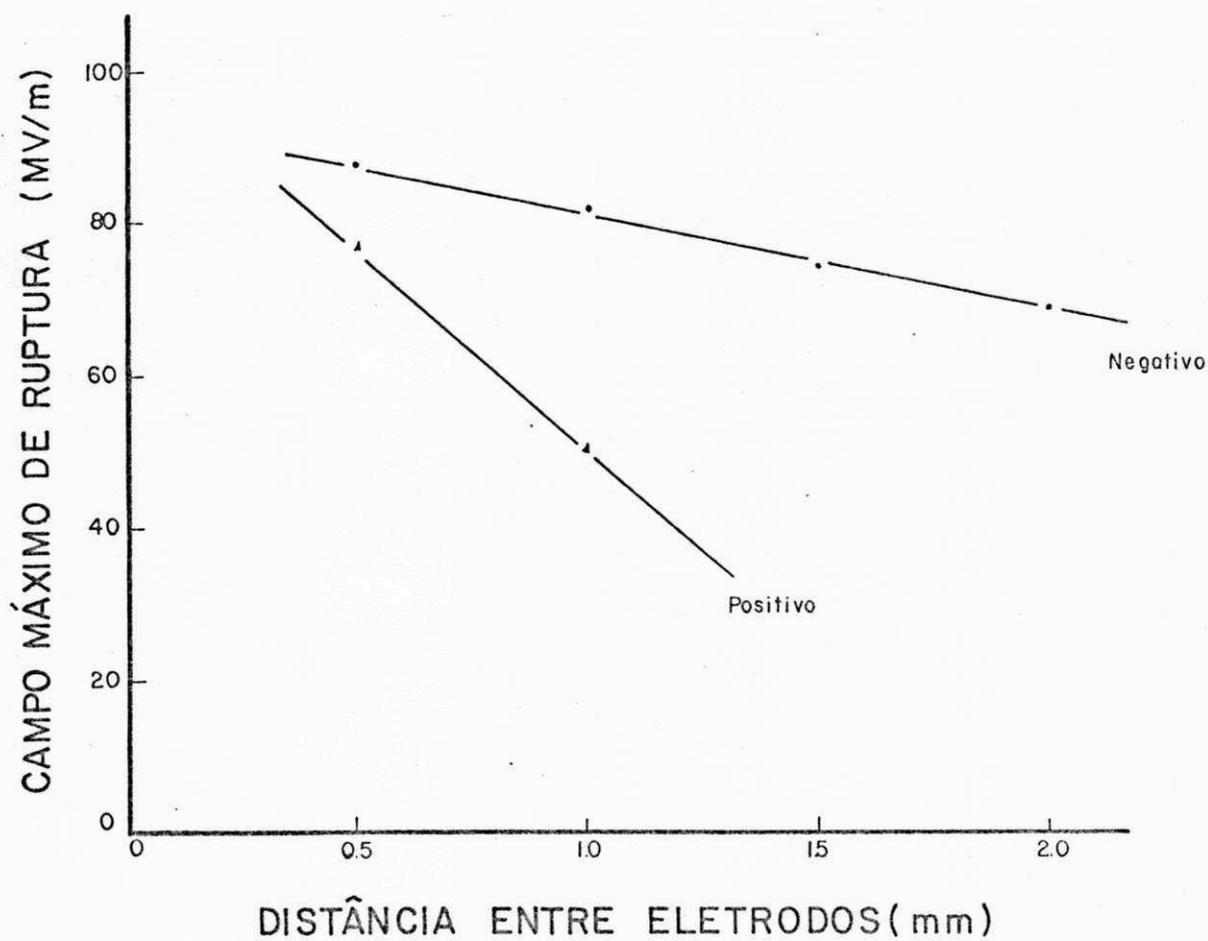


Fig. 5.16 Campo máximo de ruptura, de Schmidt, tensão contínua - eletrodo hemisférico de 1 mm de raio.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
Pró-Reitoria para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222-N 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

Os resultados obtidos com impulsos atmosféricos, surtos de manobra e tensão contínua, comportam-se dentro do que era esperado, ou seja, para pequenas distâncias e com raios menores, os impulsos atmosféricos positivos sobrepõem-se aos surtos de manobra que, por sua vez, sobrepõem-se à contínua. Mais uma vez, a hipótese do feixe de elétrons mostra-se bem sedimentada e os frequentes estragos no anodo confirmam a importância da superfície do catodo no fenômeno de ruptura. Para grandes distâncias, a evidência de alguma hipótese não se mostra com clareza, devido a limitações na bucha de alta tensão.

A influência de curvatura dos eletrodos apresentam-se através de dois parâmetros: campo elétrico e área. Praticamente, a área efetiva interage de forma clara com o campo elétrico de ruptura, onde um aumento no primeiro, devido à separação dos eletrodos, acarreta uma redução no segundo. Embora não se tenha

questionado nenhum fenômeno de ruptura, feixe de elétrons micro-partículas ou troca de partículas, para grandes distâncias, a tensão de ruptura mostra depender da área do eletrodo.

Para um melhor esclarecimento dos fenômenos que levam à ruptura, sugerimos que nas próximas experiências seja verificada a corrente de pré-ruptura e que se aumente a capacidade da bucha de alta tensão para que se possam efetivar os testes com grandes distâncias, inclusive compará-los aos de Nandagopal (20). Sugerimos também o acoplamento de uma máquina fotográfica à câmara de vácuo para um registro mais preciso dos fenômenos de ruptura, acarretando melhor suporte nas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ARNAL, R. - Electrical Microdischarges in Dynamic Vacua, Ann. Phys., 10, pp. 830-873, France, 1955.
02. BIRADAR, P. I. & CHATTERTON, P. A. - Proc. Conf. III, pp. 35-40, Paris, 1968.
03. BOERSCH, H., HAMISCH, H. & WIESNER, S. - Electrical Microdischarges in Vacuum, Z. angew. Phys., 13, pp. 450-456, 1961.
04. BOYLE, W. S., KISLUK, P. & GERMER, L. H. -Electrical Break down in High Vacuum, Jr. of Appl. Phys., 26, pp.720-725, 1955.
05. CHATTERTON, P. A. - A Theoretical Study of Field Emission Initiated Vacuum Breakdown, Proc. Phys. Soc., 88, pp. 231-245, 1966.

06. CHATTERTON, P. A. - The Present Status of Vacuum Breakdown Research, Proc. Conf. IV, Addenda, pp. 1-26, Waterloo, 1970.
07. CRANBERG, L. - The Initiation of Electrical Breakdown in Vacuum, Jr. of Appl. Phys., 23, pp. 518-522, 1952.
08. DUSHMAN, S. - Phys. Rev., 21, p. 623, 1923.
09. DYKE, W. P. & TROLAN, J. K. - Field Emission: Large Current Densities, Space Charge and the Vacuum Arc., Phys. Rev., 89, pp. 799-808, 1953.
10. FOWLER, R. H. & NORDHEIM, L. - Electron Emission in Intense Electric Fields, Proc. R. Soc., A119, pp. 173-181, 1928.
11. GOLDMAN, M., LOUBIERE, A., BOUTTEAU, M. & HEROIN, P.- Micro discharges, Proc. Conf. III, pp. 69-74, Paris, 1968.
12. GOOD, Jr. R. H. & MULLER, E. W. - Field Emission, Handb. d. Phys., 3rd Ed., 21, 176-231, 1956.
13. HACKAM, R. - Effects of Voltage Polarity, Electric Current, External Resistance, Number of Sparkings, Supply Frequency, and Addition of Hydrogen and Air on Electrical Break down in Vacuum, Jr. of Appl. Phys., 46, pp. 3789-3799, 1975.

14. IONOV, N. I. - Mechanism for Prebreakdown Conductivity in Vacuum Interelectrode Gaps, Sov. Phys. - Tech. Phys., 5, pp. 527-532, 1960.
15. LITTLE, R. P. & WHITNEY, W. T. - Electron Emission Proceeding Electrical Breakdown in Vacuum, Jr. of Appl. Phys., 34, pp. 2430-2432, 1963.
16. MAITLAND, A. - New Derivation of the Vacuum Breakdown Equation Relating Breakdown Voltage and Electrode Separation, Jr. of Appl. Phys., 32, pp. 2399-2407, 1961.
17. MANSFIELD, W. K. - Electrical Discharges in Continuously Pumped Vacuum Systems, Ph.D. Thesis, University of London, 1961.
18. MCKIBBEN, J. L. & BOYER, K. - Current Leading in Ion Accelerating Tubes, Phys. Rev., 82, pp. 315-316, 1951.
19. MILLER, H. C. - Influence of Electrode Curvature on Electrical Breakdown in Vacuum, Jr. of Appl. Phys., 37, pp. 784-790, 1966.
20. NANDAGOPAL, M. R. - Impulse Voltage Breakdown Characteristics of Point-to-Plane Gaps at Low Pressures, IEEE Trans. on Elec. Insul., EI-11, pp. 69-72, 1976.

21. RABINOWITZ, M. - New Observations on Electrical Breakdown in Vacuum, Proc. Conf. I, pp. 119-134, USA, 1964.
22. SCHMIDT, B. - Influence of Electrode Curvature on Breakdown Voltage of High Vacuum Gaps, Proc. Conf. VIII, B2, USA, 1978.
23. SCHMIDT, G. - Electrical Discharges in High Vacuum, Acta. Phys., 9, pp. 1-11, Hungary, 1958.
24. SCHOTTKY, W. Z. - Cold and Hot Electron Discharges, Phys., 14, pp. 63-106, 1923.
25. SLIVKOV, I. N. - Mechanism for Electrical Discharges in Vacuum, Sov. Phys. - Tech. Phys., 2, pp. 1928-1934, 1957.
26. VAN ATTA, L. C., VAN DE GRAFF, R. J. & BARTON, H. A.- A New Design for a High-Voltage Discharge Tube, Phys. Rev., 43, pp. 158-159, 1933.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Conf. I "Proceedings of the First International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
Oct. 19-21, 1964, M.I.T., Cambridge, USA.
- Conf. II "Proceedings of the Second International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
Sept. 7-8, 1966, M.I.T., Cambridge, USA.
- Conf. III "Proceedings of the Third International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
Sept. 16-18, Paris, France.
- Conf. IV "Proceedings of the Fourth International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
Sept. 1-4, 1970, Waterloo, Ontario, Canada.
- Conf. V "Proceedings of the Fifth International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
Aug.-Sept. 1972, Warszawa, Poland.

Conf. VI "Proceedings of the Sixth International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
July 15-19, 1974, Swansea, U.K.

Conf. VII "Proceedings of the Seventh International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
Aug., 1976, Novosibirsk, USSR.

Conf. VIII "Proceedings of the Eighth International Symposium on Insulation of High Voltages in Vacuum".
1978, Albuquerque, NM, USA.

LIVROS ALSTON, L. L. "High-Voltage Technology" - Oxford University Press, 1968.

DUSHMAN, S. "Scientific Foundations of Vacuum Technique" - John Wiley & Sons, Inc., 1962.

SMYTHE, W. R. "Static and Dynamic Electricity" - McGraw-Hill, Inc., 1968.