

ENSAIOS DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA DE DIFERENTES ELETRODOS E  
ESPAÇAMENTOS AO AR LIVRE E DENTRO DE PAINEL METÁLICO SOB IMPULSO  
ATMOSFÉRICO E TENSÃO ALTERNADA

José Antonio d’Affonseca Santiago Cardoso

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph. D.

---

Profa. Maria Cristina Dias Tavares, D. Sc.

---

Prof. Francisco Manoel Salgado Carvalho, D. Sc.

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

CARDOSO, JOSÉ ANTONIO D’AFFONSECA  
SANTIAGO CARDOSO

Ensaio de Suportabilidade Dielétrica de  
Diferentes Eletrodos e Espaçamentos ao Ar  
Livre e Dentro de Painel Metálico sob  
Impulso Atmosférico e Tensão Alternada  
[Rio de Janeiro] 2006

VII, 145p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação – Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, COPPE

1. Tensão Disruptiva em Espaçamentos  
I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

## Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Ao meu orientador Antonio Carlos Ferreira que tornou possível a realização deste trabalho.

Aos pesquisadores Darcy Ramalho de Mello, Edegard Gomes Junior, Orsino de Oliveira Filho, Francisco Salgado e às equipes técnicas dos laboratórios do CEPEL.

Agradeço também a Deus, a minha mãe e a minha namorada a força e paciência.

Resumo da Dissertação apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

ENSAIOS DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA DE DIFERENTES ELETRODOS E ESPAÇAMENTOS AO AR LIVRE E DENTRO DE PAINEL METÁLICO SOB IMPULSO ATMOSFÉRICO E TENSÃO ALTERNADA

José Antonio d’Affonseca Santiago Cardoso

Março/2006

Orientador: Antonio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta um estudo experimental da suportabilidade dielétrica de espaçamentos no ar submetidos a tensão de impulso atmosférico e tensão alternada. Os resultados obtidos podem contribuir para melhorar projetos de equipamentos usados em sistemas de distribuição.

Os ensaios foram feitos em diversas configurações de eletrodos, ao ar livre e em ambiente confinado metálico, com o objetivo de analisar a influência da presença das paredes metálicas aterradas no valor da tensão disruptiva. Os resultados são apresentados em gráficos que relacionam o valor da tensão disruptiva com o espaçamento entre os eletrodos.

Os valores de tensão disruptiva obtidos em ambiente confinado com paredes aterradas foram menores do que os obtidos ao ar livre, tendo sido encontrados valores até 15% menores em ensaios com tensão de impulso atmosférico de polaridade positiva.

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o isolamento de cubículos deve ser projetado considerando a suportabilidade dielétrica do ar e dos equipamentos, nele instalados, em ambiente confinado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF DIFFERENT GAPS CONFIGURATIONS IN  
AIR AND METAL-ENCLOSED UNDER LIGHTNING IMPULSE AND POWER-  
FREQUENCY VOLTAGE

José Antonio d’Affonseca Santiago Cardoso

March/2006

Advisor: Antonio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

This work describes experimental study of breakdown characteristics of air gaps under lightning impulse voltage and power frequency voltage. The results of the experiments may contribute to improve the design of equipments used in distribution systems.

The tests were made with different electrodes configurations. All the experiments included tests of the gaps in free air and with grounded parts surrounding the gap. The analysis of the influence of these parts in the breakdown characteristics of the air gaps is the aim of this work. The results are presented as a function of breakdown voltage against the gap.

The values of breakdown voltage obtained in metal-enclosed gaps were lower than the obtained in free air. In the case of lightning impulse voltage of positive polarity a difference of 15% between these values was found. As expected, it was shown that the metal-enclosed ambient influences the value of the breakdown voltage of air gaps.

The results obtained in this work emphasize that the insulation design of metal-enclosed equipments must consider the values of dielectric strength of air, and of the installed equipment, obtained in closed environments tests.

# ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
3.1 - TÉCNICAS DE ENSAIO E MEDIÇÃO EM ALTA TENSÃO .....	9
3.1.1 - FONTES DE ALTA TENSÃO .....	9
3.1.1.1 - FONTE DE ATCA.....	9
3.1.1.2 - FONTE DE IMPULSO DE TENSÃO.....	10
3.1.2 - IMPULSO DE TENSÃO ATMOSFÉRICA .....	12
3.1.3 - MEDIÇÃO EM ALTA TENSÃO .....	13
3.1.4 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....	15
3.1.4.1 - ENSAIO DE TENSÃO ALTERNADA (60 Hz) .....	15
3.1.4.2 - ENSAIO DE IMPULSO DE TENSÃO ATMOSFÉRICA (IA).....	15
3.1.5 - CORREÇÃO ATMOSFÉRICA .....	16
3.2 - FÍSICA DA DESCARGA - DESCARGA EM DIELÉTRICOS GASOSOS .....	17
3.2.1 - FUNDAMENTOS DO CAMPO ELÉTRICO .....	17
3.2.2 - MODELOS BÁSICOS DE DISRUPÇÃO EM GASES .....	18
3.2.2.1 - MODELO DE TOWNSEND .....	18
3.2.2.1.1 - Coeficiente de Ionização Primário .....	19
3.2.2.1.2 - Coeficiente de Ionização Secundário.....	22
3.2.2.1.3 - Critério de Disrupção de Townsend.....	25
3.2.2.1.4 - Lei de Paschen .....	26
3.2.2.1.5 - Aplicação do Critério de Townsend a Campos Elétricos Não Uniformes.....	27
3.2.2.2 - MODELO “STREAMER”.....	29
3.2.2.2.1 - Aplicação do Modelo “Streamer” a Campos Elétricos Não Uniformes.....	32
3.2.2.3 - GASES ELETRONEGATIVOS.....	34
3.2.2.4 - EFEITO DA POLARIDADE, DESCARGA EM CAMPOS NÃO UNIFORMES .....	35
3.2.2.4.1 - Polaridade Positiva .....	35
3.2.2.4.2 - Polaridade Negativa.....	36
3.2.2.5 - EFEITO DE BARREIRAS EM CAMPOS NÃO UNIFORMES..	39
3.2.2.6 - DESCARGA AO LONGO DE SUPERFÍCIES DIELÉTRICAS SÓLIDAS, NO AR.....	41
3.2.2.6.1 - Descarga Superficial por Campo Uniforme Tangencial ....	41

3.2.2.7 - EFEITO DA UMIDADE DO AR NA TENSÃO DISRUPTIVA....	43
4 - SIMULAÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO .....	44
4.1 - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....	44
4.1.1 - EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA PROBLEMAS DE ELETROSTÁTICA.....	44
4.2 - SIMULAÇÕES .....	45
4.2.1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....	46
5 - IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL.....	58
5.1 - JUSTIFICATIVAS .....	58
5.1.1 - ITENS DE ENSAIO .....	58
5.1.2 – ENSAIOS REALIZADOS.....	59
5.2. ARRANJOS DE ENSAIO.....	60
5.3 – PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS.....	62
5.4 - RESULTADOS .....	67
5.4.1 - ENSAIOS DE IMPULSO ATMOSFÉRICO.....	68
5.4.1.1 – ENSAIOS AO AR LIVRE .....	68
5.4.1.2 – ENSAIOS EM AMBIENTE CONFINADO.....	76
5.4.1.3 – RESULTADOS COM OS ISOLADORES.....	86
5.4.2 - ENSAIOS DE TENSÃO ALTERNADA .....	90
5.4.2.1 - ENSAIOS AO AR LIVRE.....	90
5.4.2.2 - ENSAIOS EM AMBIENTE CONFINADO .....	92
5.4.2.3 - ENSAIOS COM ISOLADORES.....	94
6 - CONCLUSÃO .....	96
ANEXO A .....	99
ANEXO B .....	111
ANEXO C .....	114
ANEXO D .....	120
ANEXO E .....	128
ANEXO F.....	130
ANEXO G.....	133
BIBLIOGRAFIA .....	147

# 1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho visa analisar a suportabilidade dielétrica de espaçamentos no ar, a partir de ensaios realizados em um laboratório de alta tensão. Os ensaios realizados visam a determinação da tensão suportável e disruptiva de tensão alternada e de impulso atmosférico. Os resultados obtidos auxiliam no projeto de equipamentos com isolamento interna, a ar, em ambientes metálicos fechados.

É necessária a definição [9] de alguns termos que freqüentemente utilizados neste trabalho:

- suportabilidade dielétrica, que pode ser entendido como um nível de isolamento caracterizado por um conjunto de tensões suportáveis,
- isolamento interna, que pode ser entendido como sendo as distâncias em ar e superfícies de isolantes sólidos de um equipamento que estão sujeitas a solicitações dielétricas mas que estão protegidas dos efeitos atmosféricos e externos.

O objetivo deste trabalho é estudar a variação da suportabilidade dielétrica de configurações de eletrodos em espaçamentos no ar, causadas por diferentes geometrias das pontas, espaçamentos entre os eletrodos e tipo de tensão aplicada, bem como da influência causada pela proximidade de objetos aterrados no valor da tensão disruptiva de espaçamentos no ar.

A motivação de realizar este trabalho foi estudar um tema, que embora antigo, possui um lado que ainda não tinha sido explorado: a determinação da suportabilidade dielétrica de espaçamentos em diferentes configurações de eletrodos , ao ar livre e em ambientes confinados. As informações obtidas nos ensaios são de grande importância prática, ajudando nos projetos de equipamentos e na escolha do isolamento adequado.

A mínima tensão disruptiva de espaçamentos no ar livre já foi estudada por outros autores [1, 5, 6 e 8]. Estes trabalhos, porém, se concentraram em espaçamentos acima de 1 metro. Este trabalho é focado nos espaçamentos variando de 2,5 cm a 50 cm, ou seja, os pequenos espaçamentos.

Um exemplo prático da influência de partes aterradas na suportabilidade dielétrica do meio isolante é encontrado no interior de cubículos, que são a unidade estrutural em



invólucro metálico de conjuntos de manobra e controle, podendo conter em seu interior dispositivos de manobra e componentes associados.

O estudo da suportabilidade dielétrica de cubículos é importante para ajudar no desenvolvimento de novos projetos, porque existe a necessidade de otimização dos sistemas em termos de dimensão, confiabilidade e custos. Muitas vezes, esses requisitos seguem tendências conflitantes e acabam comprometendo o desempenho dos sistemas. Os fabricantes tentam atender às novas necessidades, mas, mesmo assim, tem ocorrido um alto índice de falhas nos ensaios iniciais de cubículos em laboratório.

As normas [9, 19 e 21] que especificam os valores de tensão suportável consideram apenas equipamentos instalados ao ar livre e não equipamentos confinados entre paredes metálicas. Além do mais, todas as normas exigem que qualquer equipamento aterrado fique a uma distância de no mínimo 1 metro do equipamento que está sendo ensaiado. A influência na distribuição de campo elétrico e conseqüentemente na tensão disruptiva, de partes aterradas ou energizadas ao redor da configuração de eletrodos, é um dos mais importantes parâmetros se tratando de desenvolvimento de instalações de alta tensão.

A pesquisa em laboratórios é muito cara e demorada fazendo com que os projetistas busquem alternativas como simulações computacionais, difíceis de serem implementadas, ou o método de tentativa e erro. Principalmente sobre esse aspecto é que esse trabalho pretende contribuir, por meio de experimentos com diferentes configurações de espaçamentos ao ar livre e em meios confinados entre paredes metálicas, gerando um grande número de resultados. Além da parte experimental, é apresentada uma parte teórica resumida.

Os resultados obtidos, apresentados em forma gráfica junto com o que já existe na bibliografia, fornecem um conteúdo que pode servir como base para considerações na fase de projeto e ensaios de equipamentos de alta tensão, principalmente cubículos.

## **1.1 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em cinco capítulos principais, como descrito abaixo.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica visando situar este trabalho nas pesquisas que vêm sendo feitas nesta área.

No capítulo 3 é apresentada uma base teórica envolvendo a parte de laboratório e ensaio e a parte da física da descarga.

No capítulo 4 são feitas simulações pelo Método dos Elementos Finitos para diversas configurações de eletrodos.

No capítulo 5 é descrita toda a implementação experimental do trabalho.

No capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se um resumo dos artigos que serviram como base para este trabalho. Estes foram julgados os mais relevantes entre os artigos encontrados que tratam deste assunto. Deles pode-se extrair teorias e resultados experimentais.

Como se pode observar, este assunto já é estudado há algum tempo, pois o estudo de distâncias de isolamento é de grande importância para o desenvolvimento e confiabilidade de sistemas elétricos. Dependendo do autor os estudos são teóricos ou experimentais.

A abordagem deste trabalho é única no que se refere ao estudo de espaçamentos em ambientes confinados e por conter uma grande quantidade de informações experimentais abrangendo desde pequenos espaçamentos aos maiores.

### Artigo 1: Power-Frequency AC Sparkover Voltage Measurements of Small Air Gaps [1]

O autor apresenta resultados experimentais de espaçamentos pequenos ao ar livre (até 30cm) com tensão alternada, que foram obtidos com configurações de eletrodos mais práticas, e compara com os valores de tensão obtidos com a configuração haste-haste. O estudo foi feito utilizando eletrodos haste, ponta, esfera, plano, condutores, ferramentas e acessórios. Os valores utilizados como referência para a comparação foram obtidos das normas internacionais, que apresentam as tabelas das tensões disruptivas das configurações haste-haste e esfera-esfera em montagens padronizadas.

Seus resultados mostraram que em tensão alternada os únicos arranjos que tiveram tensão disruptiva menor do que a configuração haste-haste foram: haste-plano e ponta-plano.

Artigos 2 e 3: Theoretical Investigation on Barrier Effect on Point-Plane Air Gap Breakdown Voltage Based on Streamers Criterion [2] e Influence of Barriers on the Lightning and Switching Impulse Strength of Mean Air Gaps in Point-Plane Arrangements [3]

Estes trabalhos apresentam o estudo dos efeitos de uma barreira, material isolante, inserida em espaçamentos no ar ponta-plano, utilizando simulações eletrostáticas das configurações envolvidas, pelo método dos Elementos Finitos.

O aprendizado obtido destes artigos foi sobre simulações pelo método dos Elementos Finitos de configurações de eletrodos e sobre a teoria do processo de formação de descargas com a presença de barreiras, considerando-se a formação de cargas.

Nesses artigos é mostrada a necessidade de conhecimentos sobre a distribuição de campo elétrico e de potencial dos arranjos envolvidos em projeto de sistemas de alta tensão.

A introdução da barreira leva a uma redistribuição do campo elétrico ao longo do espaçamento, e uniformiza o campo entre a barreira e o plano, sendo que na polaridade positiva o ganho é maior que na negativa, que é quase imperceptível.

Em dielétricos gasosos, a distribuição de cargas é afetada pela presença da barreira. Os íons são bloqueados pela barreira e se distribuem pela sua superfície, criando uma carga superficial. O resultado é um campo mais uniforme entre a barreira e o plano e o aumento do valor da tensão disruptiva.

Os autores concluem que os fatores mais importantes que influem na eficácia da barreira aumentar a suportabilidade dielétrica do espaçamento entre os eletrodos da presença são sua posição, dimensões, polaridade, tipo de tensão e a condutividade da superfície da barreira.

Artigo 4: Corona Between Point Plane Electrodes in Air at Atmospheric Pressure [4]

Neste artigo foram estudadas em laboratório configurações de eletrodos ponta-plano entre 20mm e 50mm com ponta hemisférica variando de 1,2mm a 3mm para determinar o início de corona com tensão contínua em ambas as polaridades. Foi

analisada a não uniformidade do campo elétrico ao longo do espaçamento ao se variar o espaçamento entre os eletrodos e as dimensões da ponta.

É apresentada e discutida a implementação experimental do estudo e analisada a utilidade da teoria de formação de descarga nos estudos de corona.

O autor conclui que o corona na ponta do eletrodo aumenta quando se diminui o diâmetro dos eletrodos, porque aumenta a não uniformidade do campo elétrico no espaçamento entre os eletrodos.

#### Artigo 5: Dielectric Breakdown in Non uniform Field Air Gaps [5]

Neste artigo os autores fizeram uma revisão das características da disrupção de eletrodos haste-haste e haste-plano submetidos a tensão contínua nas polaridades positiva e negativa.

É mostrado que a tensão disruptiva de polaridade positiva varia linearmente com o espaçamento nas duas configurações.

No processo de formação de descarga a formação do “streamer” positivo predomina, então, pode-se obter um valor aproximado da tensão disruptiva pelo produto do valor do campo elétrico do “streamer” positivo e seu comprimento, mais uma pequena componente do “streamer” negativo, de menor comprimento. Já que para a formação do “streamer” negativo é preciso um campo não uniforme no catodo, uma alternativa para evitar sua formação foi usar um plano no lugar da haste. Como não será formado “streamer” negativo, a tensão disruptiva será determinada apenas pelo “streamer” positivo.

Os resultados obtidos com a configuração de eletrodos haste-plano mostraram-se não ser influenciado pela variação da umidade, além de serem mais precisos para medição da tensão disruptiva, porque tiveram pouca variação nos resultados de várias medidas.

Os autores mostraram que o campo elétrico médio para disrupção no caso de polaridade negativa é maior que na polaridade positiva, então, a tensão suportável também é maior. A influência da umidade para impulsos de tensão na polaridade negativa é desprezível. Idem para tensões contínua.

O artigo conclui que a configuração haste-plano proporciona melhores medidas experimentais na polaridade positiva do que a configuração haste-haste e que pode ser usada também na polaridade negativa. Na polaridade positiva o valor da tensão disruptiva é mais sensível aos efeitos da umidade.

#### Artigo 6: Calculation of Breakdown Voltages of Short Air Gaps [6]

O autor realizou experimentos com eletrodos do tipo esfera e plano para determinar os respectivos valores da tensão disruptiva em condições atmosféricas padronizadas e comparar com modelos computacionais. Foram estudadas a influência da geometria dos eletrodos e sua disposição no espaço.

O artigo também mostrou que o modelo “streamer” descreveu bem o fenômeno ao se comparar com os resultados experimentais.

#### Artigo 7: Modeling and Analysis of Electric Field Distribution in Air Gaps, Stressed by Breakdown Voltages [7]

Este artigo mostra a modelagem e a análise da distribuição de campo elétrico em espaçamentos no ar submetidos à tensão disruptiva. O campo elétrico é modelado pelo método de Elementos Finitos.

O autor mostra que a geometria dos eletrodos influencia na uniformidade da distribuição do campo elétrico ao longo do espaçamento.

É observada a utilidade de simulações eletrostáticas pelo método dos Elementos Finitos na determinação do grau de uniformidade da distribuição de campo elétrico de configurações de eletrodos.

#### Artigo 8: Dielectric Strength of Air Gaps Below 2m [8]

Neste artigo o autor compara os resultados obtidos em seus ensaios com resultados da bibliografia. A configuração analisada foi a haste-plano submetida a impulsos de tensão de diversas formas e tensão alternada de 60Hz.

O autor determinou limites de espaçamentos válidos para as fórmulas encontradas na bibliografia, além de sugerir as suas próprias. Os espaçamentos apresentados variam

de 20 cm a 2 m. Observa-se a falta de informação sobre pequenos espaçamentos na literatura. Nesta categoria são apresentados valores de tensão disruptiva apenas para os espaçamentos de 20 cm e 40 cm.

Os artigos citados serviram como base teórica para assuntos que irão ser utilizados ao longo deste trabalho. A pesquisa por artigos que tratavam de suportabilidade dielétrica de espaçamentos de eletrodos também serviu para localizar em quais áreas estavam faltando dados e que poderiam ser exploradas. As opções escolhidas para este trabalho foram o estudo de pequenos espaçamentos de eletrodos e a comparação da suportabilidade do ar no ar e em ambiente confinado.

## **3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Neste capítulo é apresentado um resumo da base teórica necessária para a parte experimental do estudo da suportabilidade dielétrica de espaçamentos no ar de diversas configurações de eletrodos. Este resumo abrange: conceitos de campo elétrico, a teoria da física da descarga restrita a dielétricos gasosos e as técnicas de ensaio e medição em laboratórios de alta tensão restringindo-se aos ensaios de impulso de tensão e de alta tensão em corrente alternada 60Hz.

### **3.1 - TÉCNICAS DE ENSAIO E MEDIÇÃO EM ALTA TENSÃO**

Para realizar um ensaio de Alta Tensão (AT) é necessário haver a integração de vários recursos técnicos que requerem estudos específicos. Tais recursos envolvem geração, controle e medição de AT. Os engenheiros e técnicos que atuam em laboratórios de AT devem ter conhecimento sobre cada um desses recursos e devem ter uma noção de como integrá-los para poder realizar os ensaios.

Algumas informações importantes sobre técnicas de alta tensão são apresentadas a seguir.

#### **3.1.1 - FONTES DE ALTA TENSÃO**

As fontes de alta tensão podem ser divididas em duas categorias, dependendo do tipo de tensão gerada: Fontes de Alta Tensão em Corrente Alternada (ATCA) e fontes de impulso de tensão.

##### **3.1.1.1 - FONTE DE ATCA**

O transformador elevador é uma das formas de se obter ATCA e foi utilizado nos ensaios deste trabalho, conforme mostrado na figura 3.1. Considerando que, o objetivo principal dos ensaios de alta tensão é avaliar o desempenho dielétrico dos equipamentos, o transformador elevador utilizado como fonte não precisa ter potência elevada, ou seja, normalmente alguns mA de corrente são suficientes. Neste aspecto, o transformador utilizado como fonte de alta tensão nos ensaios difere dos



transformadores de potência, o que o torna mais compacto, versátil e economicamente viável para laboratórios.

O isolamento destes transformadores de ensaio é projetado para suportar os transitórios de alta frequência e as sobretensões de descargas disruptivas frequentes.



Figura 3.1 – Transformador monofásico 230kV, laboratório CEPEL

### 3.1.1.2 - FONTE DE IMPULSO DE TENSÃO

O gerador de impulso, como o nome sugere, gera impulsos de tensão para ensaios dielétricos, e foi utilizado como fonte de impulso de tensão, figura 3.2.

O circuito de um estágio de um gerador de impulso está apresentado na figura 3.3, onde R1 é a resistência de frente, R2 a resistência de cauda, C1 a capacitância de cada estágio, C2 a capacitância do objeto de ensaio e SG (“spark gap”) é o centelhador de disparo do gerador.

Gerador de impulso

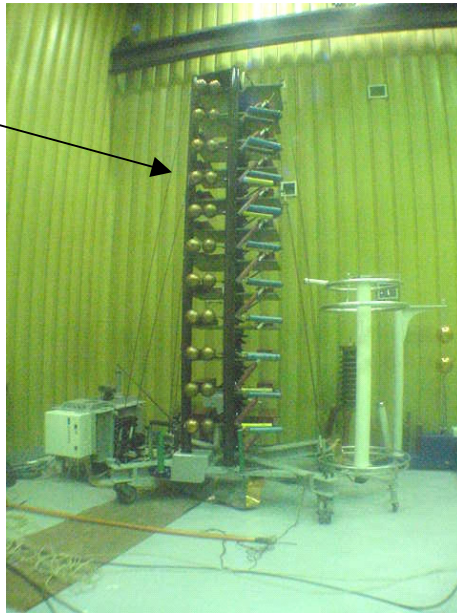


Figura 3.2 – Gerador de impulso em um laboratório de AT do CEPEL

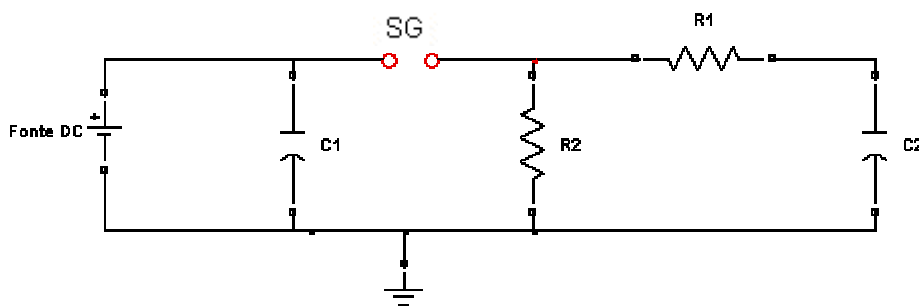


Figura 3.3 - Exemplo de 1 estágio do gerador de impulso

O princípio de funcionamento do gerador de impulso consiste em carregar os capacitores C1 de todos os estágios em paralelo, através de uma fonte de corrente contínua usualmente com tensão máxima da ordem de 50 kV a 200 kV, que é também a tensão nominal de cada estágio do gerador. Terminado o período de carga, a energia armazenada nos capacitores é descarregada no terminal de alta tensão do objeto sob ensaio, pela disrupção intencional dos centelhadores de esfera, SG, conectando, assim, em série todos os capacitores C1 dos estágios. A tensão máxima a ser aplicada ao objeto sob ensaio será, então, a soma dos valores de tensão dos estágios individuais, a menos das perdas internas no próprio gerador. Em condições normais essas perdas, em relação à soma direta da tensão de carga de cada estágio, são de 5 a 15%.

Os valores das resistências de frente e cauda servem para ajustar o tempo de frente e cauda da forma de onda de impulso de tensão. As fórmulas para o cálculo aproximado dos tempos de frente e cauda de um impulso de tensão são, respectivamente [13]:

$$T_f = 2,5 \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (3.1)$$

$$T_c = 0,69 R_2 (C_1 + C_2) \quad (3.2)$$

### 3.1.2 - IMPULSO DE TENSÃO ATMOSFÉRICA

Um dos tipos de impulso usualmente gerado em laboratório tem sua forma de onda padronizada e é chamado de “impulso atmosférico pleno” [9].

O impulso atmosférico pleno caracteriza-se por possuir forma de onda conhecida como “1,2/50”, esta forma de onda é caracterizada por duas constantes de tempo  $T_1$  e  $T_2$ , sendo  $T_1$  “responsável” pela frente de onda e  $T_2$  pela cauda. A forma de onda do impulso e  $T_1$  e  $T_2$  são mostrados na Figura 3.4. Oscilações presentes no sinal de impulso, próximas da crista, não devem exceder ao limite de 5% do valor de crista determinado.

O disparo dos vários estágios do gerador de impulso pode gerar interferências no início da frente do impulso, dificultando encontrar sua origem real, então, para impulsos atmosféricos, é padronizado o procedimento de medição de tempos a partir da origem virtual ao invés da origem real. A origem virtual é definida pela interseção da reta que liga os pontos de amplitude de 30% e 90% do valor de crista com o eixo do tempo, figura 3.4.

A forma de onda “1,2/50” é apenas a representação de uma forma de impulso factível em laboratório, utilizando-se o gerador de impulso e não representa, necessariamente, a forma de onda real provocada por uma descarga atmosférica em um sistema de transmissão e distribuição.

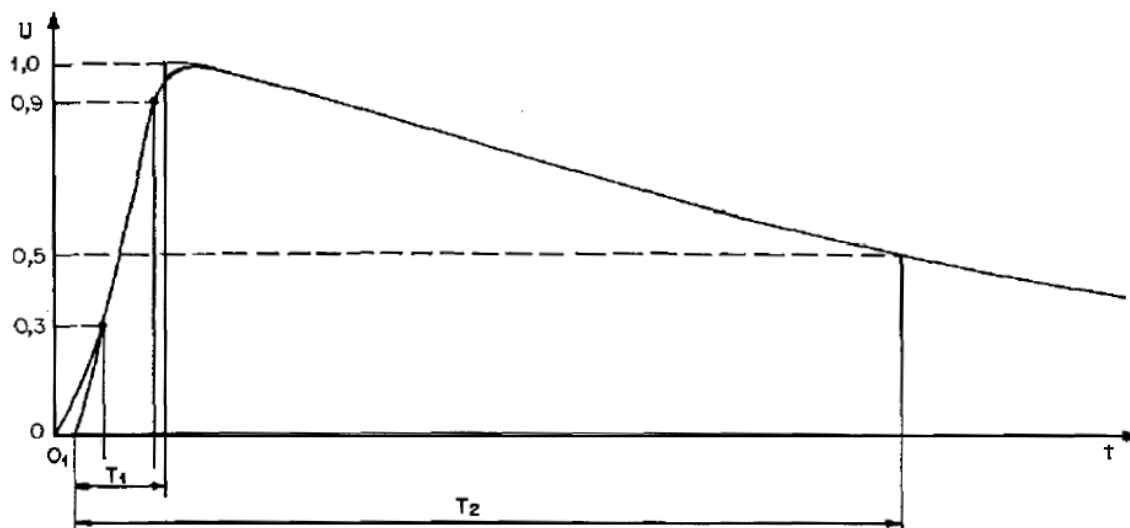


Figura 3.4 – Características da forma de onda de impulso atmosférico, sendo  $O_1$  a origem virtual,  $U$  valor de tensão,  $t$  o tempo,  $T_1$  o tempo virtual de frente e  $T_2$  o tempo virtual de cauda. [9]

### 3.1.3 - MEDIÇÃO EM ALTA TENSÃO

Pode-se dizer que uma das partes mais importantes em um ensaio é a medição, pois a partir dela todos os resultados serão obtidos, e uma medição com baixa incerteza garante a confiabilidade do ensaio.

Uma questão importante a se considerar é que para toda medida, que é o resultado de uma medição, existe uma incerteza associada. A incerteza é uma estimativa caracterizando a faixa de valores em torno do resultado de uma medida, dentro da qual o valor verdadeiro da medida pode se encontrar.

Um sistema de medição necessita estar aprovado para ser utilizado em ensaios, para isto, deve ser avaliado sempre com todos os seus componentes conectados. Um sistema de medição aprovado para impulso pleno de AT deve ter incerteza da medição menor que 3% para amplitudes e 10% para tempo. Para medição de ATCA a incerteza da medição de amplitude deve ser menor que 3% [22].

Um sistema de medição compreende um dispositivo de conversão, um sistema de transmissão e instrumentos indicadores ou de registro. Um exemplo de um sistema de

medição é apresentado na figura 3.5, composto por um divisor de tensão, cabo coaxial e osciloscópio [10].

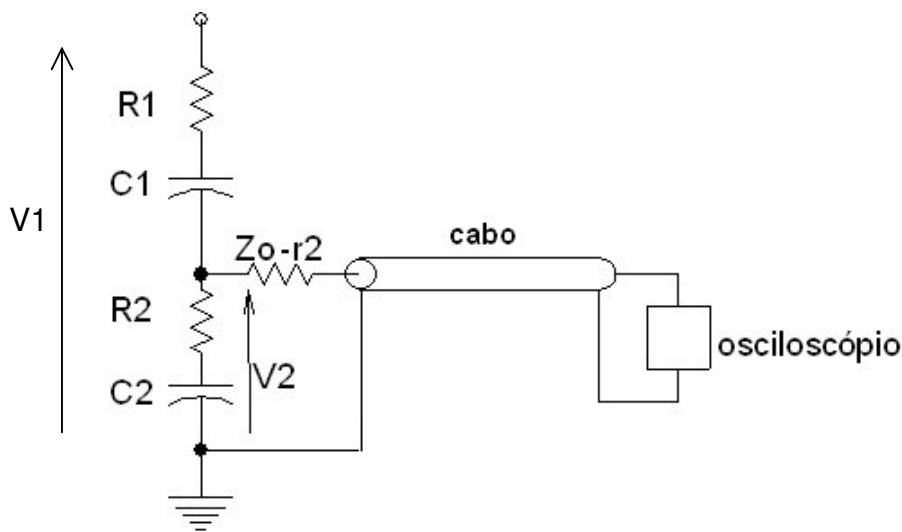


Figura 3.5 – Exemplo de uma representação de um sistema de medição de alta tensão, composto por: divisor misto série, cabo coaxial e osciloscópio. A resistência e a capacitância das unidades de alta tensão de baixa tensão são representadas respectivamente por: R1, C1, R2 e C2. A impedância característica do cabo é  $Z_0$  e sua resistência é  $r_2$ .  $V_1$  é a tensão a ser medida (alta tensão) e  $V_2$  é o valor de tensão medido na unidade de baixa tensão.

Um dos componentes de um sistema de medição citado anteriormente é o divisor de tensão, que é constituído pela associação série de um conjunto RC. Essas impedâncias caracterizam a unidade primária ou de alta tensão e a unidade secundária ou de baixa tensão do divisor.

É o divisor de tensão que conecta o sistema de medição à alta tensão. O divisor não deve interferir no ensaio então a impedância da unidade de alta tensão deve ter um limite mínimo. Sua classificação é feita pelo tipo de impedância de alta tensão e dependendo da natureza da tensão a ser medida é utilizado um tipo específico.

No momento da medição é preciso saber qual é o fator de escala associado ao sistema em uso. O fator de escala é o fator pelo qual a tensão registrada na instrumentação deve ser multiplicada para saber qual o valor da alta tensão aplicada ao objeto sob ensaio.

### **3.1.4 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO**

Em todos os ensaios realizados procurou-se seguir os procedimentos de ensaio prescritos pela norma NBR 6936 [9]. A idéia de seguir estes procedimentos é permitir a reprodutibilidade desses ensaios. Um breve resumo destes procedimentos será apresentado a seguir.

#### **3.1.4.1 - ENSAIO DE TENSÃO ALTERNADA (60 Hz)**

O ensaio de determinação da tensão suportável com tensão alternada é feito elevando-se, de modo constante e sem interrupção, a tensão até o momento da descarga completa do dielétrico. Após cada descarga, espera-se um minuto para aplicar novamente a tensão. O valor a ser considerado deve ser medido no instante imediatamente anterior ao da ocorrência da descarga disruptiva pelo osciloscópio. Para isto, é preciso que a fonte seja desligada imediatamente após a descarga de forma que o osciloscópio registre pelo menos três ciclos antes do instante da descarga, inclusive.

A determinação da tensão disruptiva assegurada para 60Hz é feita pela média aritmética da tensão obtida em 10 aplicações, corrigida para as condições atmosféricas padrão, conforme 3.1.5.

#### **3.1.4.2 - ENSAIO DE IMPULSO DE TENSÃO ATMOSFÉRICA (IA)**

O ensaio de determinação da tensão suportável de impulso atmosférico é feito pelo método de acréscimos e decréscimos [9]. Com esta metodologia obtém-se a tensão com 50% de probabilidade de causar descarga disruptiva no objeto sob ensaio,  $U_{50\%}$ .

O método consiste na aplicação de impulsos de mesma forma e valores de crista diferentes. O ensaio é iniciado com a aplicação de um impulso que provoque descarga disruptiva no objeto ensaiado, o valor do impulso seguinte deve ser reduzido de 3% em relação ao valor anterior, devido à ocorrência da descarga. Caso o impulso aplicado não provoque descarga disruptiva o valor de tensão do impulso seguinte deverá ser 3% maior do valor aplicado anteriormente. São aplicados 30 impulsos em cada

polaridade, positiva e negativa, seguindo essa regra de mais ou menos 3% e a tensão  $U_{50\%}$  é obtida pela média dos valores obtidos em cada polaridade.

### 3.1.5 - CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

A descarga disruptiva em uma isolação externa depende das condições atmosféricas no instante do ensaio. Em geral, a tensão disruptiva para uma dada distância no ar cresce com a densidade ou umidade do ar. Entretanto quando a umidade relativa excede cerca de 80%, o comportamento da tensão disruptiva se torna irregular, em especial quando a descarga ocorre ao longo da superfície isolante. Pela aplicação dos fatores de correção, a tensão de ensaio medida nas condições ambientais durante o ensaio pode ser convertida ao seu valor equivalente nas condições atmosféricas de referência. Admite-se que a tensão disruptiva é proporcional ao fator de correção ( $K_t$ ), que é resultado do produto dos fatores de correção para densidade do ar ( $K_1$ ) e de correção para a umidade ( $K_2$ ). A relação entre  $U_{50\%o}$  e  $U_{50\%}$  é mostrada na equação (3.3).

$$U_{50\%o} = U_{50\%} / K_t \quad (3.3)$$

sendo:

$U_{50\%o}$  a tensão nas condições atmosféricas padrão;

$U_{50\%}$  a tensão medida.

O fator de correção para densidade do ar  $K_1$  depende da densidade relativa do ar ( $\delta$ ) e do expoente  $m$ , e é expresso por:

$$K_1 = \delta^m \quad (3.4)$$

O fator de correção para a umidade  $K_2$  depende do tipo da tensão de ensaio e, para fins práticos, pode ser obtido como função da razão da umidade absoluta ( $h$ ) por  $\delta$  em curvas encontradas na norma NBR 6936, onde  $k_r = 1+0,010.(h/\delta-11)$  para tensão de impulso e  $1+0,012.(h/\delta-11)$  para tensão alternada.

$$K_2 = k_r^w \quad (3.5)$$

Os valores de  $m$  e  $w$  são obtidos em função de  $g$  na curva encontrada no anexo C da norma NBR 6936 [9].

Como o fator de correção,  $K_t$ , depende do tipo de pré-descarga esse fato é levado em conta, considerando o parâmetro  $g$ :

$$g = U_{50\%} / (500 \cdot d_{\text{arco}} \cdot \delta \cdot k) \quad (3.6)$$

sendo  $d_{\text{arco}}$  a distância de arco a seco em metros, definida como a menor distância que separa dois eletrodos, podendo ser a distância do espaçamento, ou a altura do isolador.

A norma IEC 60060-1 afirma que para valores da relação  $h/\delta$  (umidade absoluta / densidade relativa do ar) maiores ou igual a  $15 \text{ g/m}^3$  as curvas de correção atmosférica são meramente indicativas sendo ainda objeto de estudos.

As condições atmosféricas padrão segundo a norma são:

Temperatura:  $T_0 = 20^\circ\text{C}$

Pressão:  $B_0 = 101,3 \text{ kPa}$ ,  $760 \text{ mmHg}$

Umidade absoluta:  $H_0 = 11 \text{ g/m}^3$

### **3.2 - FÍSICA DA DESCARGA - DESCARGA EM DIELETRICOS GASOSOS**

Neste item serão apresentados alguns conceitos básicos sobre campo elétrico e a física da descarga. Como os ensaios foram feitos para estudar espaçamentos no ar, apenas a teoria de dielétricos gasosos vai ser apresentada.

As teorias de física da descarga apresentadas podem ajudar a explicar alguns fenômenos e os resultados obtidos nos ensaios, como a simples diferença entre os valores de tensão de impulso atmosféricos nas polaridades positiva e negativa ou a influência de um isolador no meio do espaçamento.

#### **3.2.1 - FUNDAMENTOS DO CAMPO ELÉTRICO**

O campo elétrico num ponto é definido como o limite da razão da força sobre uma carga teste pelo valor de sua respectiva carga [12]. Pode-se definir também o campo elétrico, em uma situação eletrostática, como sendo o gradiente do potencial elétrico. No caso eletrostático o campo pode ser definido apenas por:

$$\text{grad } V = \nabla V = -E \quad (3.7)$$



O aumento do potencial elétrico entre dois pontos ao longo de uma linha de campo elétrico é uma medida do gradiente. Visto que o potencial aumenta no sentido contrário ao do campo, o sentido do gradiente é oposto ao do campo, por isto o sinal negativo.

O conceito de linhas de campo foi elaborado por Michael Faraday para auxiliar a visualização da estrutura do campo elétrico associado a uma distribuição de carga particular. Uma linha de força é uma linha imaginária traçada de tal forma que sua direção e sentido em qualquer ponto sejam os do campo elétrico naquele ponto. As linhas equipotenciais, de mesmo valor de potencial elétrico, são sempre ortogonais às linhas de campo.

A intensidade de campo suportado por um dielétrico é limitada, se um valor determinado for ultrapassado ocorrerá uma descarga e a ruptura do dielétrico. Esta descarga é conhecida como descarga disruptiva e está associada à falha da isolação, normalmente ela interliga os eletrodos da isolação ensaiada reduzindo a tensão entre eles a zero.

Utilizando-se um material suposto homogêneo e isotrópico possuindo uma suportabilidade dielétrica associada a um campo elétrico  $E_b$  para isolar dois eletrodos submetidos a uma diferença de potencial  $V$ , a distância entre os eletrodos deve ser calculada por: distância de isolamento =  $V / E_b$ . Um projeto otimizado utiliza o valor do campo máximo como  $E_b$ .

### **3.2.2 - MODELOS BÁSICOS DE DISRUPÇÃO EM GASES**

A seguir serão apresentados os modelos de Townsend e “Streamer”, os quais são considerados de maior importância no entendimento do comportamento físico da descarga [13, 14, 15].

#### **3.2.2.1 - MODELO DE TOWNSEND**

Townsend [15] foi o primeiro a estudar a variação da corrente elétrica em um gás, medida entre dois eletrodos de placas paralelas, em função da tensão aplicada. A teoria desenvolvida por ele será apresentada resumidamente a seguir.

### 3.2.2.1.1 - Coeficiente de Ionização Primário

Em estudos sobre a condução de corrente elétrica em gases, Townsend [15] realizou experiências analisando a trajetória de um elétron entre dois eletrodos planos e paralelos colocados em um recipiente onde pressão e temperatura eram rigorosamente controladas, figura 3.6.

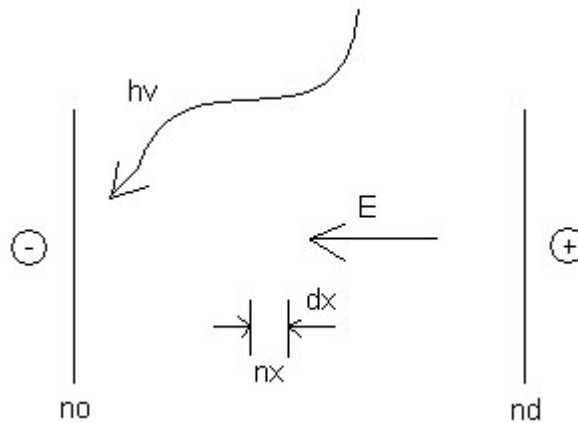


Figura 3.6 – Representação do modelo experimental de Townsend. A energia da radiação é dada por  $h \cdot \nu$ , onde  $h$  é a constante quântica,  $\nu$  a frequência,  $E$  o módulo do vetor campo elétrico,  $n_0$  o número de elétrons na posição 0 e  $n_d$  o número de elétrons no eletrodo oposto.

Townsend [14, 15] fez incidir sobre um dos eletrodos (catodo) radiação com energia suficiente para liberar elétrons da superfície do mesmo. Com o aumento da diferença de potencial aplicada às placas observou-se que a corrente crescia até atingir um valor constante, ou seja, todos os elétrons liberados do catodo eram acelerados pelo campo elétrico gerado pelos eletrodos e chegavam ao anodo sem que nenhuma ionização fosse observada. A este valor constante de corrente, Townsend denominou de corrente de saturação.

Entretanto, quando um determinado valor de tensão era atingido, notava-se um crescimento exponencial da corrente. Townsend descreveu esta multiplicação de elétrons como o resultado de múltiplas ionizações das moléculas ou átomos do gás, ou seja, os elétrons acelerados pelo campo elétrico adquirem energia suficiente para provocar sucessivas colisões ionizantes.

A figura 3.7 mostra um gráfico com a variação da corrente através do gás em função da diferença de potencial aplicada aos eletrodos, segundo a experiência de Townsend. A região “1 2” da curva representa a corrente de saturação devida aos elétrons liberados do catodo e a região “2 3” representa o crescimento exponencial da corrente devido às colisões ionizantes. Esta região também é conhecida como região de descargas de Townsend.

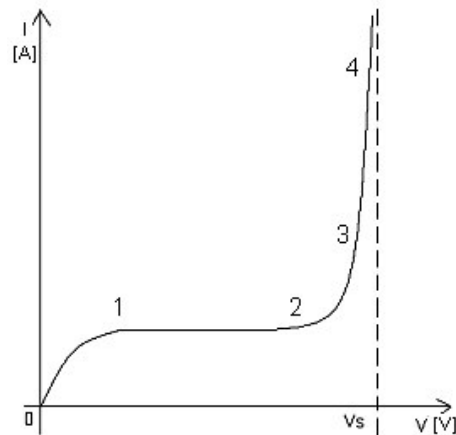


Figura 3.7 – Gráfico tensão aplicada versus corrente no circuito. Variação da corrente no ar em função da diferença de potencial aplicada entre duas placas

Segundo Townsend [14] o aumento do número de elétrons,  $dn$ , devido às colisões ionizantes pode ser dado pela expressão:

$$dn \propto n \cdot dx \quad (3.8)$$

onde  $n$  representa o número de elétrons liberado do catodo e  $dx$  uma pequena distância onde se deseja calcular o aumento de elétrons.

Townsend introduziu nesta relação um coeficiente que determina o número de ionizações causadas por um elétron na unidade de comprimento e o denominou de primeiro coeficiente de ionização,  $\alpha$ , logo:

$$dn = \alpha \cdot n \cdot dx \quad (3.9)$$

De acordo com a figura 3.6, se na posição 0, definida como a posição do catodo, o número de elétrons é igual a  $n_0$ , pode-se dizer que o número total de elétrons na posição  $d$ , definida como a posição do eletrodo positivo, será igual a  $n_d$ :

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \int_0^d \alpha \cdot dx \quad (3.10)$$

$$n_d = n_0 \cdot \exp(\alpha \cdot d)$$

ou

$$i = i_0 \cdot \exp(\alpha \cdot d)$$

sendo  $\exp(\alpha \cdot d)$  o valor da exponencial do produto  $\alpha \cdot d$ .

A quantidade  $\exp(\alpha \cdot d)$  na equação (3.10) representa o fenômeno chamado de avalanche de elétrons, e representa o número de elétrons produzidos por um elétron no percurso do catodo ao anodo.

Uma análise mais detalhada do coeficiente de ionização pode ser realizada considerando-se a distribuição dos caminhos livres aplicada aos elétrons [13].

De acordo com a teoria cinética dos gases, um elétron só provocará ionização em uma colisão se sua energia cinética for maior ou igual à energia potencial de ionização das moléculas ou átomos do gás [13,14]. Naturalmente um elétron acelerado por um campo elétrico adquire uma energia que é função da distância percorrida, expressa por:

$$W = q E L \quad (3.11)$$

onde  $q$  representa a carga do elétron, que vale  $1,6 \times 10^{-19}$  Coulombs e  $L$  a distância.

Se  $L$  representar o caminho livre ( $\lambda$ ) percorrido pelo elétron antes de uma colisão, é fácil observar que para ocorrer ionização em uma colisão o caminho mínimo que um elétron deve percorrer é igual a [13]:

$$\lambda = \frac{V_i}{E} \quad (3.10)$$

sendo  $V_i$  chamado de potencial de ionização.

Uma vez que o caminho livre depende da densidade das moléculas ou átomos de um determinado gás [13,14], é de se esperar que o coeficiente de ionização não dependa somente da intensidade do campo elétrico  $E$ , mas também será fortemente influenciado pela pressão a que está submetido o gás. De acordo com isto, pode-se obter uma expressão que relaciona o coeficiente de ionização  $\alpha$  com o campo elétrico

**E** e a pressão **p** a que está submetido o gás. De uma forma geral os resultados experimentais mostram que:

$$\left(\frac{\alpha}{p}\right) = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (3.13)$$

Townsend obteve após algumas considerações uma expressão aproximada, [13,14], na forma:

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \quad (3.14)$$

onde **A** e **B** são constantes que dependem do tipo de gás e são em geral obtidas experimentalmente [13,14,15].

Os valores das constantes **A** e **B** para alguns gases assim como suas respectivas faixas de aplicação para os valores de **E/p** estão nas tabelas 3.1.

Tabela 3.1 – Valores das constantes A e B para alguns gases, para T= 20°C [13]

Gás	A [ionizações/cm.Torr]	B [V/cm.Torr]	Faixa E/p válida [V/cm.Torr]
Ar	15	365	100-800
N <sub>2</sub>	12	342	100-600
H <sub>2</sub>	5	130	150-600
He	3	34	20-150

### 3.2.2.1.2 - Coeficiente de Ionização Secundário

O modelo elaborado por Townsend consegue explicar o fenômeno da condução de corrente nos gases, entretanto é limitado a determinados valores de **E/p**. De acordo com a figura 3.7, nota-se que na região “3 4” a corrente tem um crescimento diferente do previsto por Townsend, ou seja, aumentando-se continuamente a tensão aplicada aos eletrodos é observado um crescimento sobre exponencial da corrente.

Além disso, para um determinado valor de tensão observa-se que a corrente cresce indefinidamente sem que a tensão seja aumentada, caracterizando assim uma ruptura total no isolamento do gás. Pode-se dizer então que a corrente passa a ser auto-sustentada não dependendo mais da corrente inicial provocada pela liberação de fóton e elétrons do catodo [13].

Townsend realizou várias experiências com diferentes espaçamentos entre os eletrodos e pôde observar o comportamento da corrente para diferentes valores de  $E/p$ . Observou também que, para o ar, o crescimento sobre exponencial da corrente ocorre para valores maiores que 110 V/cm.Torr [13].

Para explicar o crescimento sobre exponencial da corrente, e logicamente a transição para uma descarga auto-sustentada, vários mecanismos de ionização secundária foram sugeridos.

Alguns mecanismos secundários podem ser citados então como:

1 - O bombardeamento do catodo por íons positivos (Townsend) [13];

$$i = i_0 \cdot \frac{\exp(\alpha \cdot d)}{1 - \gamma \cdot (\exp(\alpha \cdot d) - 1)} \quad (3.15a)$$

2 - Liberação de elétrons devido à colisão de íons positivos com as moléculas neutras do gás [13];

$$i = i_0 \cdot \frac{(\alpha - \beta) \cdot \exp((\alpha - \beta) \cdot d)}{\alpha - \beta \cdot \exp((\alpha - \beta) \cdot d)} \quad (3.15b)$$

3 - Emissão de fótons devido a moléculas em estado excitado [14].

$$i = i_0 \cdot \frac{\exp(\alpha \cdot d)}{1 - \gamma_m \cdot (\exp(\alpha \cdot d) - 1)} \quad (3.15c)$$

Devido à grande semelhança encontrada nos resultados dos vários processos, Townsend observou que o mecanismo secundário mais provável seria a liberação de elétrons por meio do bombardeamento de íons positivos na superfície do catodo.

Segundo Townsend, a ionização das moléculas ou átomos do gás provoca o surgimento de íons positivos que se deslocam em direção ao catodo. Os íons positivos ao colidirem com o catodo são responsáveis pela liberação de novos elétrons que contribuem para o aumento da corrente que flui através do gás.

O número de elétrons liberado do catodo é igual a  $n_0$ . O número total de elétrons liberados do catodo será então igual a:

$$n'_0 = n_0 + \Delta n \quad (3.16)$$

onde  $\Delta n$  representa o acréscimo no número de elétrons devido ao bombardeamento de íons positivos na superfície do catodo.

Entretanto, se  $n$  representa o número total de elétrons que chegam ao anodo, o acréscimo  $\Delta n$  pode ser representado pela diferença entre o número total de elétrons que chegam ao anodo  $n$  e o número total de elétrons liberados do catodo, ou seja:

$$\Delta n = (n - n'_0) \quad (3.17)$$

Sendo assim, o número total de elétrons liberado do catodo será igual a:

$$n'_0 = n_0 + \gamma \cdot (n - n'_0) \quad (3.18)$$

onde  $\gamma$  representa o coeficiente secundário de ionização.

Os elétrons se movendo em direção ao anodo provocam colisões ionizantes aumentando assim o número de elétrons livres no gás. O número total de elétrons que chegam ao anodo pode ser dado então por:

$$n = n_0 \cdot \exp(\alpha \cdot d)$$

$$n = n_0 \cdot \exp(\alpha \cdot d) + \gamma \cdot (n - n'_0) \cdot \exp(\alpha \cdot d) \quad (3.19)$$

então :

$$n = \frac{n_0 \cdot \exp(\alpha \cdot d)}{1 - \gamma \cdot (\exp(\alpha \cdot d) - 1)}$$

Sendo assim a corrente total que flui através do gás será dada por:

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha \cdot d)}{1 - \gamma \cdot (\exp(\alpha \cdot d) - 1)} \quad (3.20)$$

onde  $\alpha$  e  $\gamma$  representam respectivamente os coeficientes primário e secundário de ionização,  $i_0$  a corrente foto-elétrica e  $d$  a separação dos eletrodos.

A determinação experimental do coeficiente secundário de Townsend pode ser obtida a partir da equação (3.20), medindo-se a corrente através do gás para vários valores de pressão, intensidade de campo e afastamento dos eletrodos.

Pode-se observar a dependência marcante do coeficiente  $\gamma$  com os diversos tipos de materiais utilizados.

### 3.2.2.1.3 - Critério de Disrupção de Townsend

A corrente que flui através de um gás pode ser escrita, de uma forma geral, utilizando-se a equação (3.20), que considera um mecanismo secundário de ionização do meio gasoso. Entretanto, se o potencial aplicado aos eletrodos não for suficiente para gerar algum tipo de efeito secundário a equação (3.20) se reduz a  $i = i_0 \cdot \exp(\alpha \cdot d)$ , que representa a corrente na região de descarga não auto-sustentada [13].

Se algum mecanismo secundário de ionização se faz presente nota-se um crescimento muito rápido da corrente através do gás. Teoricamente, a corrente torna-se infinita quando na equação (3.20) faz-se o denominador igual a zero, ou seja:

$$1 - \gamma \cdot (\exp(\alpha \cdot d) - 1) = 0 \tag{3.21}$$

$$\gamma \cdot (\exp(\alpha \cdot d) - 1) = 1$$

A equação (3.21) é conhecida como Critério de Disrupção de Townsend que define a transição de uma descarga não auto-sustentada para uma descarga auto-sustentada. Próximo à condição de transição observa-se que  $\exp(\alpha \cdot d) \gg 1$  [13]. A equação (3.21) pode ser então representada em sua forma reduzida, ou seja:

$$\gamma \cdot \exp(\alpha \cdot d) = 1 \tag{3.22}$$



De acordo com Loeb [14] o critério proposto por Townsend pode ser analisado de uma forma mais geral, considerando-se que:

- Para  $\gamma \exp(\alpha \cdot d) < 1$  a corrente que flui através do gás é dada pela equação (3.21) e não é auto-sustentada;
- Para  $\gamma \exp(\alpha \cdot d) = 1$  a corrente se torna auto-sustentada devido ao bombardeamento do catodo por íons positivos e o critério define o limiar da disrupção;
- Para  $\gamma \exp(\alpha \cdot d) > 1$  a ionização produzida por avalanches sucessivas é cumulativa, fazendo com que a descarga cresça rapidamente, provocando assim uma total disrupção do gás.

O critério adotado por Townsend supõe a geração de avalanches sucessivas, sendo que as quantidades  $\exp(\alpha \cdot d)$  e  $\gamma$  variam individualmente para cada avalanche. Conseqüentemente, a tensão de disrupção correspondente a  $\gamma \exp(\alpha \cdot d) = 1$  apresentará alguns erros, considerando-se que são utilizados para os cálculos os valores médios de  $\gamma$  e  $\alpha$  obtidos experimentalmente.

#### 3.2.2.1.4 - Lei de Paschen

O critério de disrupção de Townsend pode prever a tensão disruptiva de um espaçamento com o uso apropriado dos valores  $\alpha$  e  $\gamma$  correspondentes aos valores de  $E/p$ . Desenvolveu-se então uma expressão analítica baseada em (3.22) conhecida como Lei de Paschen, que relaciona a tensão de disrupção  $V_b$  com o produto  $p \cdot d$ , onde  $p$  é a pressão do gás e  $d$  a separação dos eletrodos [13]. Segundo resultados experimentais, a lei de Paschen pode ser representada de uma forma geral por:

$$V_b = f(p \cdot d) \quad (3.23)$$

Para campos elétricos uniformes pode-se obter uma expressão para o cálculo da tensão disruptiva em função do produto  $p \cdot d$ , segundo o critério de Townsend.

Substituindo-se em (3.21) a equação que relaciona  $\alpha/p$  com  $E/p$  e sabendo que  $V = E \cdot d$ , tem-se que:

$$A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot p \cdot d}{V}\right) \cdot d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (3.24)$$

$$V_b = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln\left(\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)}$$

sendo  $\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)$  o valor do logaritmo neperiano de  $\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)$ . A equação (3.24) representa a tensão de disrupção como uma função única do produto  $p \cdot d$  uma vez que  $B$ ,  $A$  e  $\ln(1 + 1/\gamma)$  são constantes determinadas pelo tipo de gás, para um determinado valor de  $E/p$ .

Uma observação importante que deve ser considerada é que, segundo a Lei de Paschen, se a distância entre os eletrodos e a pressão a que está submetido o gás são alteradas de tal forma que o produto entre estas grandezas não seja modificado, a tensão de disrupção deve-se manter sempre constante.

Contudo a utilização da Lei de Paschen para valores extremamente altos ou baixos do produto  $p \cdot d$  mostra que a tensão de disrupção  $V_b$  deixa de ser uma função única de  $p \cdot d$  [13, 14].

### 3.2.2.1.5 - Aplicação do Critério de Townsend a Campos Elétricos Não Uniformes

A aplicação do critério de Townsend a campos elétricos uniformes, para pequenos espaçamentos, apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais. Entretanto, em sistemas práticos é muito difícil, ou quase impossível, se obter campos elétricos rigorosamente uniformes. Logicamente, em tais sistemas a distribuição do campo elétrico varia ao longo do espaçamento entre os eletrodos e conseqüentemente se observa uma variação no coeficiente de ionização  $\alpha$ .

O critério de Townsend aplicado a campos elétricos não uniformes pode ser escrito na seguinte forma:

$$\gamma \left[ \exp \left( \int_0^d \alpha(x) \cdot dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (3.25)$$

onde  $\gamma$  e  $\alpha$  representam, respectivamente, os coeficientes primário e secundário de ionização e  $d$  a distância entre os eletrodos considerados. A integral apresentada na equação (3.25) deve ser calculada na região de maior intensidade do campo elétrico entre os eletrodos.

A aplicação do critério de Townsend a campos elétricos considerados não uniformes se torna muito duvidosa, isto porque, considerando-se que o coeficiente de ionização  $\alpha$  é função do campo elétrico  $\mathbf{E}$ , e se em uma determinada região entre os eletrodos a intensidade do campo for tal que a integral ( $\int \alpha \cdot dx$ ) seja igual a zero, a corrente que atravessa o gás se torna unicamente dependente do coeficiente  $\gamma$  de ionização, o que torna impossível a sustentação da corrente no meio [13]. Isso pode ser visto mais à frente nas simulações, onde em configurações de campo muito não uniformes existe uma região de campo muito intenso, onde  $\alpha > 0$ , mas o campo fora desta região pode ser fraco fazendo com que  $\alpha \approx 0$ .

A equação (3.25) só pode ser considerada válida, no caso de valores de pressão maiores ou iguais ao da pressão atmosférica padrão, para campos ligeiramente não uniformes [13], o que torna difícil sua aplicação à maioria dos equipamentos elétricos de alta tensão, onde normalmente se observam geometrias muito diversificadas dos eletrodos.

O modelo de Townsend também não apresenta nenhuma informação a respeito do desenvolvimento temporal dos processos que levam à ruptura total do gás.

Entretanto, segundo Townsend, o crescimento da corrente através do gás ocorre devido às colisões ionizantes e à emissão secundária de elétrons por bombardeamento de íons positivos no catodo. Sendo assim o tempo mínimo para a formação de uma descarga deve ser igual ao tempo de transição dos elétrons e íons entre os eletrodos.

Várias medições utilizando pulsos de tensão comprovaram que o tempo de formação de uma descarga é bem menor do que o previsto pelo modelo de Townsend.

Logicamente qualquer mecanismo secundário envolvendo bombardeamento de íons no catodo se torna duvidoso [13].

Outro fato importante é que o modelo de Townsend não considera o efeito das cargas espaciais criadas no processo de ionização do gás. A concentração de íons positivos e elétrons na avalanche muitas vezes atinge valores que causam distorção no campo elétrico original provocando aumento ou diminuição local do coeficiente de ionização [17]. Observa-se então que o modelo proposto por Townsend, apesar de explicar com boa precisão muitos fenômenos relacionados às descargas elétricas nos gases, não é de aplicação geral, principalmente para grandes espaçamentos entre eletrodos.

Devido às várias limitações encontradas neste modelo, outros foram elaborados, considerando que o mecanismo secundário de ionização mais provável seria a foto-ionização das moléculas do gás devida às recombinações que ocorrem na avalanche de elétrons ou a foto-emissão das moléculas do gás em estados excitados, eliminando assim qualquer participação do catodo como principal responsável pelo mecanismo secundário de ionização do gás [14].

### 3.2.2.2 - MODELO “STREAMER”

Os estudos realizados por Raether [15], utilizando uma câmara de nuvens para analisar o comportamento das descargas elétricas, provaram que o mecanismo secundário previsto por Townsend não era de fato realista. Raether observou que os canais de ionização tinham natureza filamentar e ramificada. Devido a este fato, Raether, Meek e Loeb elaboraram um mecanismo chamado “Streamer”, que é baseado somente nos processos de ionização referentes ao gás, eliminando assim qualquer outro processo envolvendo a participação do catodo no mecanismo secundário de ionização.

De acordo com as experiências de Raether, um elétron que se desloca entre duas placas paralelas, submetidas a um campo elétrico uniforme, provoca colisões ionizantes que podem ser descritas na forma:

$$\frac{n}{n_0} = e^{\alpha \cdot d} \quad (3.26)$$

onde  $n$  é o número de elétrons a uma distância  $x$  do catodo,  $n_0$  o número inicial de elétrons no catodo e  $\alpha$  o coeficiente de ionização. Este processo é rapidamente

cumulativo e é chamado de avalanche de elétrons. Os elétrons que se deslocam rapidamente formam a cabeça da avalanche e os íons positivos, resultantes das colisões ionizantes, formam a cauda da avalanche, figura 3.8a.

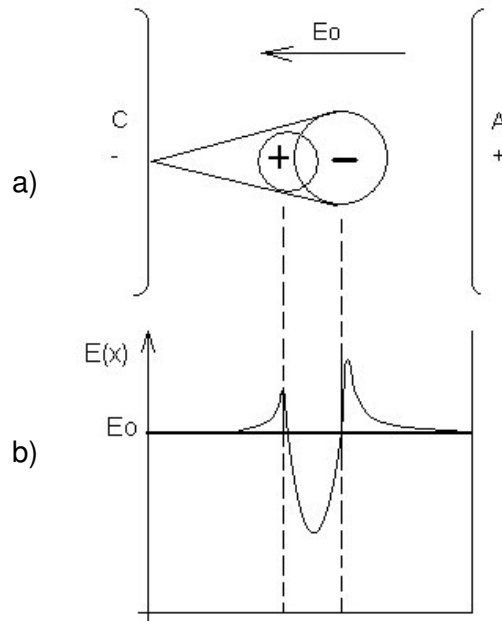


Figura 3.8 – a) Representação da distribuição de cargas espaciais em uma avalanche  
 b) Deformação no campo elétrico por estas cargas. Sendo C – catodo, A – Anodo,  
 $E(x)$  – intensidade de campo elétrico em função da posição e  $E_0$  – módulo do campo gerado pela diferença de potencial aplicada.

Segundo Raether, quando a concentração de elétrons na avalanche excede o valor de  $10^6$ , mas é menor que  $10^8$ , é observada uma deformação insignificante no campo elétrico. Entretanto, quando esta concentração ultrapassa ligeiramente o valor de  $10^8$  é observado um crescimento rápido da corrente entre os eletrodos e conseqüentemente uma deformação acentuada no campo elétrico original, figura 3.8b.

A observação de um tempo muito pequeno na formação de uma descarga elétrica levou a crer que o mecanismo responsável pela rápida multiplicação dos elétrons seria da foto-ionização das moléculas do gás nas vizinhanças da avalanche. Sob certas condições, o volume de carga que se desenvolve em uma avalanche é capaz de transformar a avalanche em canais de ionização, chamados de “streamers”. Raether observou também que para haver a transição de uma avalanche para um “streamer”

seria necessário que o número de elétrons na cabeça da avalanche atingisse um valor crítico de aproximadamente  $10^8$  [13].

Quando a avalanche atravessa o espaço entre os eletrodos e os elétrons são capturados pelo anodo observa-se um volume de íons positivos em toda a extensão do espaçamento. Como a densidade de íons positivos na região próxima ao anodo é grande e estes se recombinam com os elétrons livres, alguns fótons são emitidos, causando a foto-ionização das moléculas do gás nas vizinhanças da avalanche principal, gerando elétrons secundários. Estes, submetidos ao campo elétrico, provocam o surgimento de avalanches secundárias as quais irão se unir à principal. Os íons positivos criados pelas novas avalanches tendem a aumentar e intensificar a concentração de cargas espaciais na avalanche principal em direção ao catodo. A recombinação dos elétrons das avalanches secundárias com os íons positivos da avalanche principal provoca a emissão de novos fótons e conseqüentemente a geração de outras avalanches. Como os fótons viajam a velocidade da luz este processo se desenvolve rapidamente até que um canal altamente condutor seja formado entre o catodo e o anodo, caracterizando a disrupção total do gás. Entretanto, é bom observar que o processo descrito é válido apenas quando a diferença de potencial aplicada aos eletrodos representa tensão mínima capaz de provocar a disrupção do gás.

Segundo Meek e Raether [13], se o potencial aplicado aos eletrodos for maior do que o mínimo necessário para causar a disrupção do gás, o “comprimento crítico” da avalanche será atingido antes que a mesma chegue ao anodo. Sendo assim, as recombinações instantâneas dos íons positivos com os elétrons na “cabeça” (head [13]) da avalanche provocam a emissão de “fótons” e conseqüentemente o surgimento de novas avalanches na região entre a avalanche primária e o anodo.

De acordo com o mecanismo “Streamer”, portanto, a disrupção de um gás ocorre quando o número de elétrons existentes na cabeça da avalanche alcança um valor de aproximadamente  $10^8$ . De uma forma geral pode-se escrever que:

$$N(x) = \exp(\alpha \cdot x_c) \cong 10^8 \quad (3.27)$$

onde  $N(x)$  representa o número de elétrons a uma distância  $x$  do ponto onde se inicia a avalanche e  $x_c$  o comprimento crítico da avalanche.

Baseado nestes fatos, Raether [15] desenvolveu uma expressão empírica para o critério do “Streamer”, considerando a deformação do campo elétrico causada pela presença de cargas espaciais. Segundo Raether o critério do “Streamer” pode ser escrito na forma:

$$\alpha \cdot x_c = 17,7 + \ln(x_c) + \ln\left(\frac{E_R}{E}\right) \quad (3.28)$$

onde  $\alpha$  representa o primeiro coeficiente de ionização de Townsend,  $x_c$  o comprimento crítico da avalanche,  $E_R$  a intensidade do campo elétrico causado pelas cargas espaciais e  $E$  o módulo do campo elétrico gerado pelos eletrodos. O campo elétrico na região próxima à “cabeça” da avalanche é intensificado devido à concentração de elétrons e tem valor igual a  $(E + E_R)$ . Na região de maior concentração de íons positivos, logo após a cabeça da avalanche, a intensidade do campo é reduzida a um valor igual a  $(E - E_R)$ .

No modelo de Raether a condição para que ocorra a transição de uma avalanche para um “streamer” é que a intensidade do campo elétrico gerado pelas cargas espaciais seja aproximadamente igual a intensidade do campo aplicado ao espaçamento, ou seja,  $E_R = E$ . Sendo assim, a equação (3.28) pode ser reescrita na seguinte forma.

$$\alpha \cdot x_c = 17,7 + \ln(x_c) \quad (3.29)$$

A equação (3.29) é conhecida também como o critério de ruptura de Raether.

Para campos elétricos uniformes, o valor mínimo da tensão de ruptura pode ser obtido admitindo-se que o comprimento crítico da avalanche seja igual ao comprimento total entre os eletrodos  $d$ , ou seja,  $x_c = d$ . Desta forma tem-se que:

$$\alpha \cdot d = 17,7 + \ln(d) \quad (3.30)$$

Pode-se dizer então que a condição necessária para que ocorra uma ruptura pelo mecanismo “Streamer” é que o comprimento crítico da avalanche seja sempre menor ou igual à distância entre os eletrodos ( $x_c \leq d$ ).

### 3.2.2.2.1 - Aplicação do Modelo “Streamer” a Campos Elétricos Não Uniformes

Para campos elétricos não uniformes a variação na distribuição do campo elétrico ao longo do espaçamento entre os eletrodos implica em uma não uniformidade na

distribuição do coeficiente de ionização. Conseqüentemente, o critério de disrupção será determinado pela integral do coeficiente de ionização, ou seja:

$$\int_0^{x_c} \alpha(x).dx = k \quad (3.31)$$

onde  $\alpha$  representa o coeficiente de ionização primário na cabeça da avalanche,  $x_c$  o comprimento crítico da avalanche e  $k$  uma constante, que para o ar, à pressão atmosférica, tem valor aproximadamente igual a 20.

Substituindo-se na equação (3.31) a equação que relaciona  $\alpha/p$  com  $E/p$  (3.14), a equação pode ser aplicada a diversas configurações de eletrodos, desde que a distribuição do campo elétrico  $E(x)$  na região entre os mesmos seja conhecida e, da mesma forma que para o critério de Townsend, a equação deve ser resolvida considerando-se a região de maior intensidade do campo elétrico.

A tensão mínima de disrupção para pequenos espaçamentos é obtida considerando-se que a transição de uma avalanche para um “streamer” ocorre quando a avalanche atravessa todo o comprimento entre os eletrodos e atinge o anodo. Sendo assim a intensidade do campo elétrico gerada pela concentração de cargas espaciais deve ser igual ao campo elétrico externo e logicamente o comprimento crítico da avalanche igual ao espaçamento dos eletrodos, ou seja,  $x_c = d$ . Para espaçamentos longos, onde se observa uma não uniformidade mais acentuada na distribuição do campo elétrico, o coeficiente de ionização atinge valores próximos de zero. Somente na região próxima aos eletrodos, onde a intensidade do campo elétrico é maior, existe a possibilidade de ocorrer a transição de uma avalanche para um “streamer”. Neste caso, o comprimento crítico da avalanche é menor que o espaçamento entre os eletrodos.

Meek sugeriu então dois tipos de mecanismos aos quais chamou de mecanismo de “Streamer” I e II [15]. Em outras palavras, pode-se dizer que para o mecanismo I considera-se que o comprimento crítico da avalanche é atingido quando  $x_c = d$ , conseqüentemente, para o mecanismo II,  $x_c < d$ . A existência de dois tipos de mecanismos resulta em duas curvas diferentes que relacionam tensão de disrupção com a distância entre os eletrodos, sendo que a transição entre os mecanismos apresenta uma descontinuidade bem acentuada.

É importante observar que a solução da equação (3.36) dá condição de se definir a tensão mínima para a formação do “streamer”, entretanto no caso de campos elétricos



extremamente não uniformes esta solução dará a tensão de início do corona que poderá ou não levar a uma total disrupção no isolamento do gás.

Para condições de assimetria na distribuição do campo elétrico, como por exemplo, em uma configuração ponta-plano onde a formação do “streamer” se dá na região de campo elétrico mais intenso, próximo aos eletrodos, a tensão de disrupção em alguns casos não pode ser diretamente calculada, principalmente para espaçamentos longos onde o “streamer” passa de uma região de campo elétrico de alta intensidade para uma região de baixa intensidade. Esta condição faz com que a propagação do “streamer” seja interrompida e o que geralmente se observa é a manifestação do efeito corona.

### 3.2.2.3 - GASES ELETRONEGATIVOS

Alguns gases que possuem átomos halogêneos (Br, Cl, F, I, At) em sua estrutura são geralmente capazes de capturar elétrons livres e formar íons negativos. Esses gases são chamados de eletronegativos.

Os íons negativos têm a mesma massa que as partículas neutras do gás e são considerados partículas pesadas em relação aos elétrons livres. Sendo assim não são capazes de produzir colisões ionizantes contribuindo para a extinção da avalanche de elétrons.

Por analogia ao coeficiente de ionização, pode-se definir o coeficiente de captura como sendo o número de colisões que formam íons negativos na unidade de comprimento.

Uma descarga elétrica em um gás é iniciada por colisões ionizantes que formam a avalanche de elétrons. A multiplicação de elétrons pelo processo de colisões nos gases eletronegativos só será possível na região onde o coeficiente de ionização for maior que o coeficiente de captura. Com isso, pode-se dizer que a ionização do meio gasoso será então medida pelo número de elétrons livres na avalanche, ou seja:

$$\bar{\alpha} = (\alpha - \eta) \quad (3.32)$$

onde  $\bar{\alpha}$  representa o coeficiente de ionização efetivo do gás.

Assim como o coeficiente de ionização  $\alpha$ , o coeficiente de captura  $\eta$  mantém uma relação com o campo elétrico e a pressão do gás, ou seja:

$$\bar{\alpha} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (3.33)$$

#### **3.2.2.4 - EFEITO DA POLARIDADE, DESCARGA EM CAMPOS NÃO UNIFORMES**

Neste item será apresentado o processo de descarga considerando a formação de cargas ao longo do espaçamento [14]. Este processo é mais acentuado em configurações de campo mais não uniformes.

A formação de cargas, devido à ionização do ar, no processo de formação de descarga e sua influência no processo, não pode ser simulada por um modelo eletrostático.

Em uma configuração do tipo ponta-plano, onde o campo é fortemente não uniforme, a ionização se inicia na região de campo elétrico mais intenso, situada próxima do eletrodo, a ponta. A distorção causada pelo volume de cargas ao longo do espaçamento é diferente para a polaridade positiva e negativa.

##### **3.2.2.4.1 - Polaridade Positiva**

O processo na polaridade positiva se inicia com a presença de um elétron formado no espaçamento entre os eletrodos. Este elétron se move em direção à ponta (anodo), e ao chegar à região de campo mais intenso inicia o processo de ionização, formando as avalanches de elétrons. Se a tensão for elevada lentamente até a tensão de corona (satisfazendo a condição de descarga auto-sustentada) já haverá um número suficiente de avalanches formadas. Quando cada avalanche alcançar a ponta, os elétrons serão assimilados (aparece corrente no circuito externo) e as cargas positivas permanecerão ao longo do espaçamento, movendo-se lentamente em direção ao eletrodo oposto, o plano.

Conseqüentemente, perto da ponta fica um volume de cargas positivas que possui um campo elétrico associado e interage com o campo elétrico aplicado, figura 3.9. O campo na região da ponta diminui e na região interna do espaçamento se intensifica.

Isto dificulta novos processos de ionização próximos à ponta, dificultando também satisfazer a condição para descarga auto-sustentada.

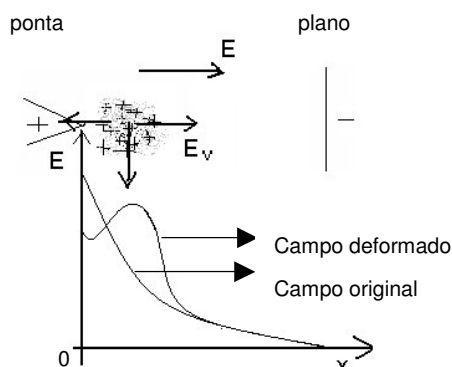


Figura 3.9 – Distorção no campo elétrico em uma configuração ponta-plano na polaridade positiva, antes da descarga auto sustentada.  $E_v$  = campo do volume de cargas

#### 3.2.2.4.2 - Polaridade Negativa

A polaridade negativa apresenta um processo diferente. Os elétrons formados próximos da superfície do catodo, ponta negativa, caem imediatamente na região de campo intenso e formam avalanches que se movem em direção ao plano.

Ao se distanciarem da região de campo intenso o processo de ionização cessa e a velocidade em direção ao anodo gradualmente diminui. Uma parte dos elétrons alcança o anodo e se neutraliza e outra parte é assimilada pelo oxigênio presente no meio, formando íons negativos. A velocidade destes íons é ainda menor. Os íons positivos gerados pelas avalanches gradualmente se movem para o catodo mas, como sua velocidade é pequena, sempre existe uma concentração de carga positiva nas proximidades da ponta. A configuração de cargas passa a ser um volume compacto de cargas positivas próximo à ponta e um volume disperso de cargas negativas ao longo do espaçamento, figura 3.10. A influência destas cargas negativas no campo aplicado externo é pequena. Entretanto, as cargas positivas distorcem o campo externo, aumentando a intensidade do campo nas proximidades da ponta. O aumento do campo facilita satisfazer a condição de descarga auto sustentada. Por isso o corona negativo aparece antes do corona positivo.

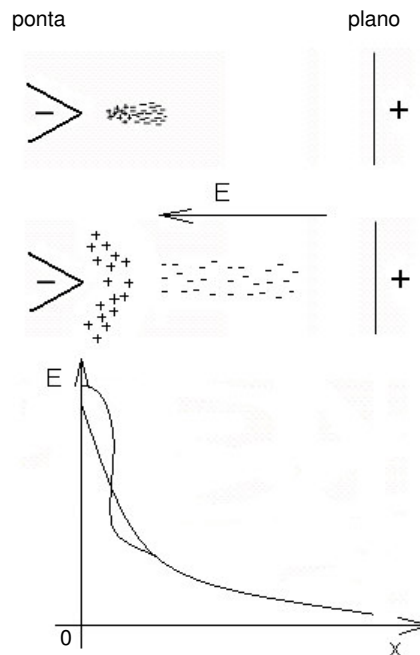


Figura 3.10 – Distorção no campo elétrico de uma configuração ponta-plano negativo no estágio de descarga não auto sustentada

O efeito da polaridade é mais bem explicado pelo próximo estágio do desenvolvimento da descarga.

Sendo a polaridade da ponta positiva e a tensão entre os eletrodos suficientemente alta, uma avalanche se inicia à direita do volume de cargas positivas, figura 3.11. A avalanche se junta com o volume de íons positivos criando as condições para o início do canal de “streamer” de anodo. Este canal é formado por plasma e suas cargas, por estarem sob o efeito de um campo elétrico, estão distribuídas de forma desigual, ficando um excesso de carga positiva na cabeça do “streamer”. Esta carga compensa o campo no canal e intensifica o campo na frente do “streamer”. Esta região de campo intenso garante a formação de novas avalanches de onde os elétrons são atraídos para o canal e os íons positivos formam o volume de carga, que aumenta mais o campo antes da “cabeça” do “streamer”. Novas avalanches são formadas e sua carga se junta ao canal do “streamer” que gradualmente alcança o catodo.

A intensidade do campo na cabeça do “streamer” pode aumentar ou diminuir com o grau de não uniformidade do campo e com a tensão aplicada aos eletrodos. Se aumentar, o alongamento do “streamer” até o eletrodo oposto está garantido, levando

à ruptura completa do espaçamento. Se diminuir, o “streamer” se limita a um comprimento que não se desenvolve mais, estabelecendo-se a descarga corona.

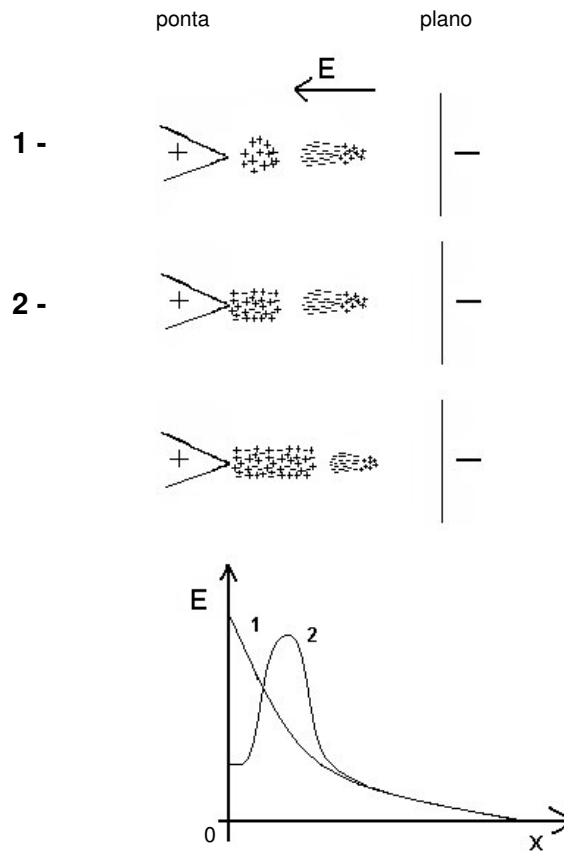


Figura 3.11 – Formação de um “streamer” de anodo.

Se a polaridade da ponta for negativa, a formação do “streamer” nas proximidades da ponta se torna difícil. O campo intenso próximo à ponta ajuda na formação de várias avalanches que se propagam em direção ao volume de carga positiva que está ao redor da ponta. Exatamente devido ao grande número de avalanches, a formação de um canal estreito de plasma é mais difícil, mas uma camada homogênea de plasma acaba se formando. Esta camada possui um raio de curvatura maior do que o da ponta e modifica o campo, intensificando-o na região da ponta e reduzindo-o na região da camada de plasma, figura 3.12.

Se o valor da tensão for sendo elevado, o processo de ionização continua no espaço entre a ponta e o plasma, que aumenta em volume e se afina na direção do eletrodo oposto. O campo se intensifica após a camada de plasma e, se o valor da tensão for

aumentado, uma avalanche de elétrons se forma nesta região. As cargas positivas destas avalanches proporcionam o aumento do campo o que leva ao aparecimento de novas avalanches à frente da camada de plasma. Esse novo volume de cargas se funde à camada de plasma anteriormente formada, na direção do eletrodo oposto, dando forma ao “streamer”. Entretanto exatamente como no início deste processo, devido ao grande número de avalanches formadas, a cabeça do “streamer” desaparece e a intensificação do campo elétrico se mostra bem menor do que na polaridade positiva.

Essas diferenças no processo de formação do “streamer” mostram porquê o processo é muito mais difícil do que na polaridade positiva, fazendo com que o valor da tensão disruptiva na polaridade negativa seja maior.

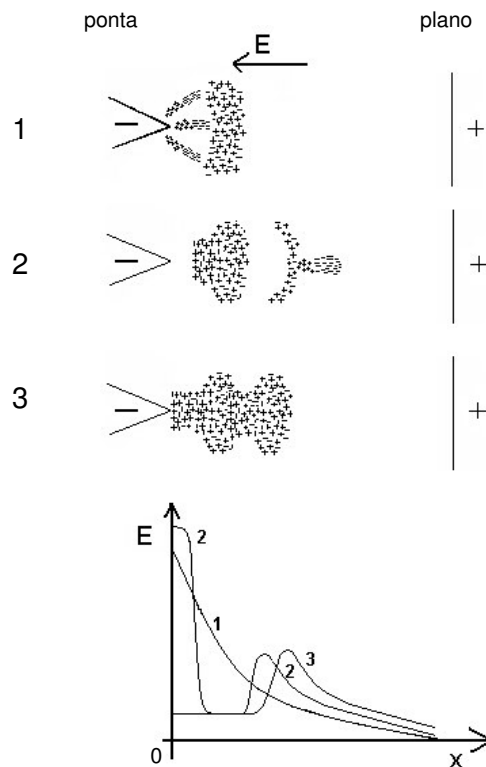


Figura 3.12 – Formação de um “streamer” de catodo.

### 3.2.2.5 - EFEITO DE BARREIRAS EM CAMPOS NÃO UNIFORMES

Uma barreira pode ser uma camada fina de algum material isolante que é colocado entre dois eletrodos para aumentar a tensão suportável, figura 3.13. A suportabilidade dielétrica do material não é muito importante para definir seu uso como uma barreira

em espaçamentos no ar. A principal influência, que leva a barreira a ter sucesso, é modificar o volume de cargas criado no processo de ionização [14].

Uma configuração ponta-plano, de polaridade positiva e sem barreira possui um volume de cargas positivas na sua vizinhança e o campo elétrico se intensifica, figura 3.9. Quando existe uma barreira, os íons positivos são barrados pela superfície e por ela se espalham. Esta distribuição de cargas faz com que o campo fique cada vez mais uniforme quanto mais distante estiver a barreira. O campo elétrico na área externa ao volume de carga também se intensifica, mas, agora, mais uniformemente ao longo de todo o espaço entre a barreira e o plano.

Na polaridade positiva uma barreira disposta não muito próxima à ponta aumenta consideravelmente a suportabilidade do espaçamento.

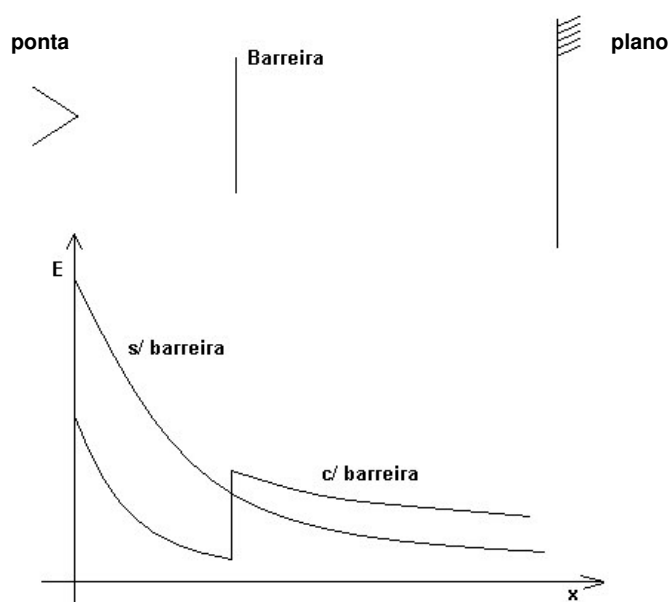


Figura 3.13 – Distribuição de campo elétrico para uma configuração ponta-plano com barreira.

Sendo a polaridade negativa, a situação é diferente. Os elétrons que se movem da ponta em direção ao plano perdem velocidade ao baterem na barreira e a maioria forma íons negativos ao se juntarem com os átomos de oxigênio. Esses íons negativos se espalham pela superfície formando um volume concentrado de cargas negativas, que seria menor e mais esparsa na ausência da barreira. Portanto, se sem a barreira o volume de cargas positivas diminui o campo elétrico, então com a barreira, o volume

de cargas negativas intensifica o campo no espaço externo. Pode-se concluir que na polaridade negativa uma barreira de material isolante entre os eletrodos diminui a tensão disruptiva.

O uso de barreiras de material isolante pode ser uma solução para ambientes onde o espaço entre os eletrodos é limitado.

### 3.2.2.6 - DESCARGA AO LONGO DE SUPERFÍCIES DIELÉTRICAS SÓLIDAS, NO AR

A simples presença de um dielétrico em um espaçamento no ar modifica sua tensão disruptiva. Outros fatores ligados ao dielétrico como o tipo do material dielétrico, a condição da superfície e o tipo de campo elétrico influenciam na tensão disruptiva.

#### 3.2.2.6.1 - Descarga Superficial por Campo Uniforme Tangencial

Foi mostrado experimentalmente em [14] que a tensão disruptiva ao longo de superfícies dielétricas é sempre menor do que a tensão disruptiva do espaçamento apenas com ar, embora a presença do dielétrico sólido não influencie a distribuição de campo elétrico, figura 3.14.

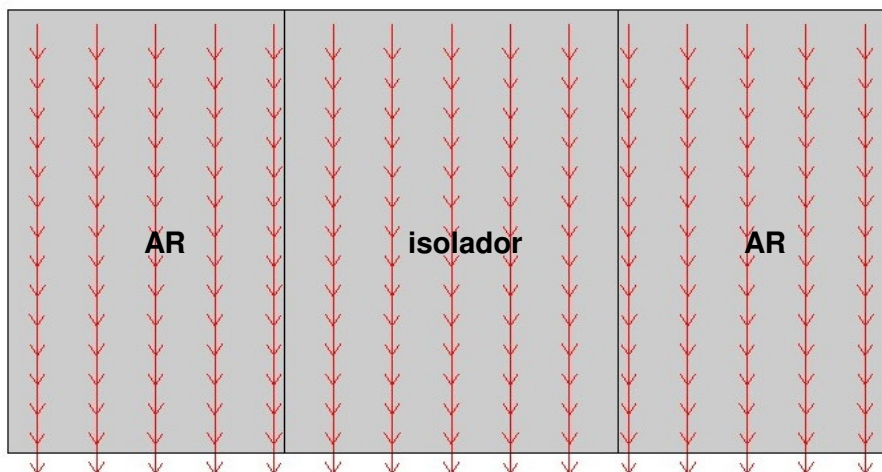


Figura 3.14 – Simulação de um isolador ( $\epsilon_R = 6$ ) no ar, preenchendo completamente o espaçamento entre os dois eletrodos. As setas representam os vetores de campo elétrico. A distribuição de campo é uniforme, por isso apenas um tom de cor representando sua intensidade é utilizado.



Uma fina camada de ar entre o eletrodo e o dielétrico pode influenciar no processo de descarga. Como a permissividade do ar é menor do que a do dielétrico, o campo se intensifica nesta região antecipando o processo de ionização que se espalha pela superfície do dielétrico, figura 3.15.

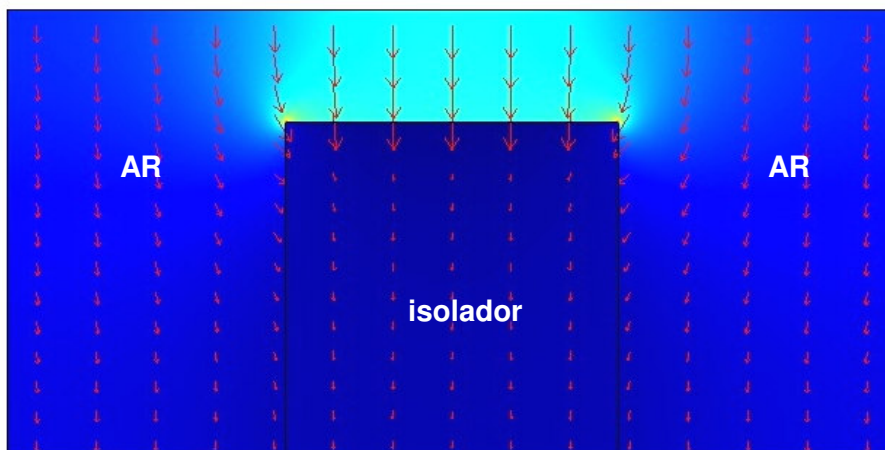


Figura 3.15 – Simulação de um isolador ( $\epsilon_R = 6$ ) no ar, não preenchendo completamente o espaçamento entre os dois eletrodos. As setas representam os vetores de campo elétrico. A cor amarela significa maior intensidade de campo.

A influência do dielétrico na tensão de descarga é maior para tensões com maior tempo de aplicação, como a alternada de frequência industrial e a tensão contínua.

A relação da tensão de descarga com a umidade do ar também é importante para o caso de descarga superficial em dielétricos. Para pequenos valores de umidade a tensão disruptiva aumenta com o aumento da umidade até o ponto crítico de condensação da umidade na superfície dielétrica, onde se observa uma queda abrupta da tensão de descarga.

A higroscopia do material dielétrico é de grande importância para o desenvolvimento da descarga superficial. A água possui condutividade iônica o que causa o acúmulo de íons perto de cada eletrodo com sua respectiva polaridade. Isto distorce o campo elétrico ao longo da superfície tornando-o não uniforme e a tensão de descarga se torna menor do que simplesmente com ar no espaçamento.

Em campos não uniformes, com campo predominantemente tangencial à superfície do dielétrico, continua valendo o que foi citado acima. Contudo, por a distribuição de

campo já ser não uniforme, a influência causada pela presença do dielétrico na distribuição é menor. Conseqüentemente, a influência na tensão de descarga é menor.

### **3.2.2.7 - EFEITO DA UMIDADE DO AR NA TENSÃO DISRUPTIVA**

A influência da umidade do ar no valor da tensão disruptiva em campos uniformes é insignificante [14]. No entanto, a influência da umidade em configurações com campos não uniformes passa a ser significativa. Neste caso é preciso fazer a correção do valor da tensão disruptiva para o valor nas condições atmosféricas normalizadas.

O efeito da umidade pode ser explicado pela presença de vapor d'água no ar, que é um gás eletronegativo. Quanto mais úmido o ar maior é a concentração de vapor d'água. Este assimila um grande número de elétrons do ar para a formação de íons negativos. Conseqüentemente, o número de partículas ionizantes no espaçamento diminui e a tensão disruptiva aumenta.

## **4 - SIMULAÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO**

Visando ajudar na análise visual do fenômeno físico, ou seja, quais as influências no campo elétrico da geometria dos eletrodos, do espaçamento e da presença ou não das paredes aterradas, foram efetuadas simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos e não houve interesse em validar os resultados obtidos com os resultados experimentais.

As simulações de campo elétrico foram feitas em um programa computacional comercial que utiliza o método dos Elementos Finitos para a solução das equações diferenciais parciais (EDP), que descrevem o fenômeno físico.

Para fazer uma simulação é preciso criar um modelo, definindo as grandezas físicas mais relevantes. Estas podem ser propriedades dos materiais envolvidos no fenômeno, cargas, constantes, fontes, fluxos, etc.

### **4.1 - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)**

Este método consiste em transformar um problema com um número indefinido de incógnitas, ou seja, os valores dos potenciais em todos os pontos de um domínio contínuo, em um problema com um número finito de variáveis. Realiza-se esta transformação a partir da divisão da região de interesse em regiões menores chamadas de elementos (triângulos, retângulos, etc.) e da interpolação da variável de campo desconhecida, no caso o potencial, por uma função conhecida dentro de cada elemento. Os valores nos pontos nodais ou nós, em geral pontos que delimitam o elemento, tornam-se as novas incógnitas. Uma vez conhecido cada elemento e suas respectivas funções, a variável de campo torna-se também conhecida [16].

#### **4.1.1 - EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA PROBLEMAS DE ELETROSTÁTICA**

As simulações foram feitas considerando-se campos eletrostáticos, definidos pelo potencial elétrico  $V$ . Campos eletrostáticos sugerem cargas e objetos em repouso, uns em relação aos outros, o que é uma idealização. Porém são úteis no desenvolvimento dos conceitos básicos.

O potencial elétrico  $V$  é uma função escalar que pode caracterizar o campo elétrico de acordo com a seguinte relação, onde “grad $V$ ” significa o gradiente do potencial elétrico  $V$ :

$$\vec{E} = -\text{grad } V = -\nabla V \quad (4.1)$$

O campo elétrico  $\vec{E}$  é relacionado com a densidade de cargas  $\rho$ , pela lei de Gauss, onde “div $\vec{D}$ ” representa o divergente do vetor densidade de fluxo elétrico,  $\vec{D}$ :

$$\text{div}\vec{D} = \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.2)$$

O vetor densidade de fluxo elétrico,  $\vec{D}$ , é dado por:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (4.3)$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do meio e seu valor para o ar é  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m.

Das relações acima obtém-se:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho \quad (4.4)$$

Para meios isotrópicos, homogêneos e lineares  $\epsilon$  é uma constante e obtém-se a equação de Poisson:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (4.5)$$

E no caso particular de  $\rho=0$ , obtém-se a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (4.6)$$

A relação (4.5), denominada equação de Poisson, é utilizada na análise de campos elétricos estáticos [12].

## 4.2 - SIMULAÇÕES

Um dos passos para se começar a simulação é desenhar a configuração a ser estudada e determinar as condições de fronteira. Essas condições são os valores de potencial da ponta, placa e da caixa que delimita o espaço em torno do arranjo. A ponta para os espaçamentos de 1 cm, 5 cm e 10 cm teve respectivamente o potencial

determinado em 10 kV, 25 kV e 40 kV, que são valores aproximados de tensão disruptiva para esses valores de espaçamentos. A placa, como esteve sempre aterrada, teve seu potencial fixado em 0 V. Já a caixa que delimita o espaço não deve influir na simulação, como se não houvesse algo que interferisse na distribuição de potencial, então foi assumido que nestas fronteiras não existe carga superficial ou que o campo é simétrico com respeito à fronteira, ou seja,  $n \cdot \vec{D} = 0$ . Na simulação das paredes metálicas ao redor dos eletrodos, as fronteiras laterais tiveram seu potencial fixado em 0 V, aterradas.

O meio dielétrico ao redor dos eletrodos foi especificado como ar, considerando na simulação a permissividade relativa  $\epsilon_R = 1$ .

O resultado natural obtido pelas simulações por MEF são linhas equipotenciais, porém o programa disponibiliza outros resultados de E e D. As simulações foram feitas em 2 dimensões (2D).

Em regiões de campo muito divergente, devido à geometria dos eletrodos, pode haver descontinuidade nos resultados da fronteiras dos elementos, introduzindo erro significativo. Isto depende da ordem da função interpolante, que aproxima os valores dentro de cada elemento a partir dos valores dos nós, e do refino da malha. A solução para este problema pode ser utilizar uma função interpolante de maior ordem ou aumentar o número de elementos na região. Nesse caso utilizou-se a opção de aumentar o número de elementos nestas regiões.

Os resultados estão em gráficos de intensidade de campo elétrico em função do tamanho do espaçamento, apresentados a seguir.

#### **4.2.1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES**

Essas simulações servem para visualizar a distribuição de campo elétrico ao longo dos espaçamentos, que podem ser uniformes ou não.

A importância de se preocupar com a distribuição de campo elétrico em um dielétrico é que esta é um dos fatores que determinam a suportabilidade dielétrica do mesmo.

Alguns parâmetros afetam a distribuição de campo. Estes podem ser o tamanho do espaçamento, o tipo de eletrodo e peças aterradas ou energizadas ao redor do gap.

Em uma distribuição de campo elétrico não uniforme uma das características mais importantes a se considerar é a distribuição desigual de intensidade do campo elétrico no espaço entre os eletrodos. Se os eletrodos de uma configuração tivessem a mesma geometria, por exemplo, ponta-ponta e plano-plano, o valor mínimo da intensidade de campo ocorreria na metade da distância entre eles e o valor máximo na superfície de cada um dos eletrodos. No caso de eletrodos com geometria diferentes, como por exemplo uma configuração ponta-plano, a intensidade máxima se dá no entorno do eletrodo de menor raio de curvatura e a região de mínima intensidade se desloca na direção do eletrodo oposto, figura 4.1.

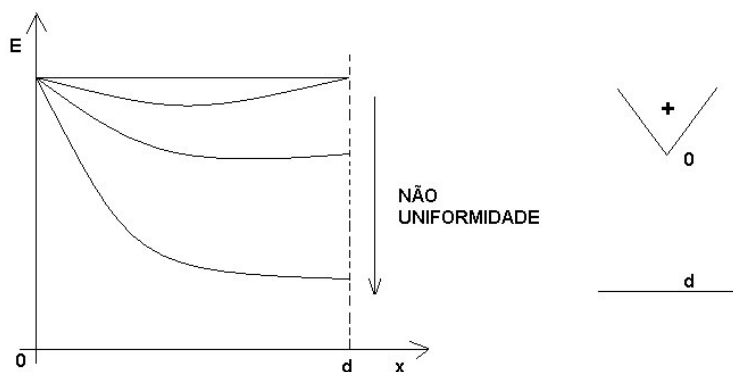


Figura 4.1 – Distribuição do campo elétrico ao longo do espaçamento, na região de menor distância, campo mais intenso

Uma maneira de se analisar a distribuição de campo elétrico ao longo dos espaçamentos está mostrada na figura 4.1.

Conforme mostrado na figura 4.1 e de acordo com o conceito do cálculo da integral da equação 3.25, de que a integral deve ser calculada na região de maior intensidade de campo elétrico, os valores de campo elétrico foram obtidos em uma trajetória retilínea partindo do eletrodo de menor raio ( $x \approx 0$ ) em direção ao plano ( $x = d$ ), a menor distância entre os eletrodos.

As seguintes configurações de eletrodos, utilizadas nas experiências, foram consideradas nas simulações:

- Haste – plano;
- Barra – plano;
- Condutor – plano.

As pontas, figura 4.2, que formam a configuração haste-plano são feitas de alumínio e suas dimensões são as seguintes:

Ponta 1 - terminação cônica com 10 mm de altura por 19 mm de diâmetro;

Ponta 2 - terminação de calota esférica 6 mm de altura e 19 mm de diâmetro;

Ponta 3 - terminação cônica com 33 mm de altura por 19 mm de diâmetro;

Ponta 4 - terminação cônica com 64 mm de altura por 19 mm de diâmetro.

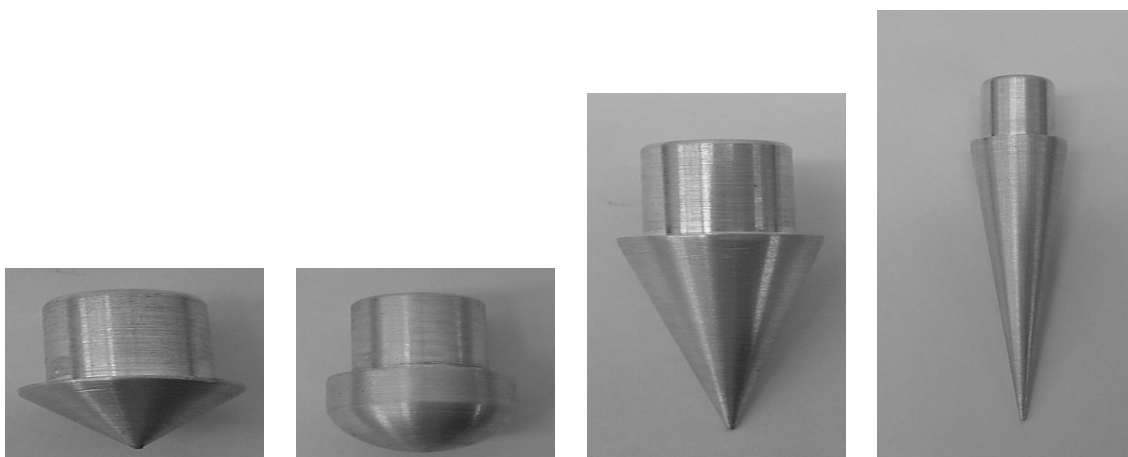


Figura 4.2 – Pontas utilizadas nos ensaios ponta-plano

As dimensões do tubo são 53 mm de diâmetro e 746 mm de comprimento, medido pelas pontas externas. A barra tem 7 mm de espessura, 51 mm de largura e 610 mm de comprimento. O tubo e a barra foram utilizados como condutores, figuras 4.3 e 4.4.

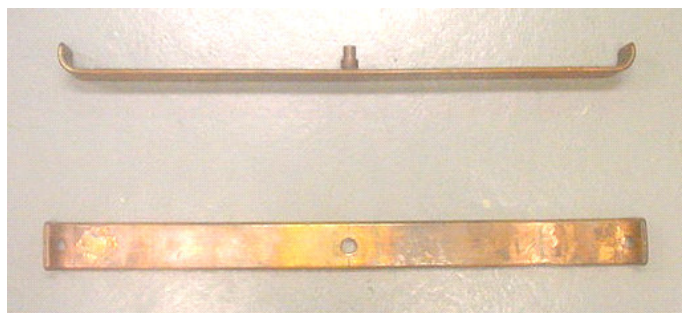


Figura 4.3 – Barras para ensaio contra o plano (superior) e conectada aos isoladores (inferior)



Figura 4.4 – Tubo para ser conectado aos isoladores

Os gráficos apresentados a seguir e no anexo B são os resultados obtidos pelas simulações pelo MEF e são apresentados como valores do campo elétrico  $E$  [kV/cm] em função da posição  $x$  [cm], contada a partir da haste ou condutor em direção ao plano. É possível observar, pelos resultados, a diferença de distribuição de campo elétrico entre as configurações ponta-plano e condutor-plano. As simulações que se intitulam “sem paredes aterradas” foram realizadas com as fronteiras limites laterais representando o infinito, ou seja, simulando um ambiente ao ar livre, já as simulações “com parede” foram realizadas com as fronteiras limites com potencial zero, representando a presença de uma parede aterrada, ou seja, um ambiente confinado, as definições dos modelos simulados estão no anexo G.

A posição  $x$ , que representa a posição ao longo do espaçamento em cm partindo do eletrodo em direção ao plano, não se inicia exatamente no valor zero. A posição zero é omitida porque coincide com a fronteira que limita o eletrodo, onde o valor do campo elétrico não é calculado.

Pode-se observar que a configuração haste-plano produz uma distribuição de campo elétrico mais não uniforme do que a configuração condutor-plano, figuras 4.5 e 4.8.



Este comportamento se deve à forma geométrica dos eletrodos, uma forma mais aguda, como a da ponta 4, tende a produzir uma concentração de campo maior em apenas um ponto. A distribuição de campo elétrico no caso do eletrodo tubo se dá ao longo de toda a sua superfície, que é mais arredondada, sendo mais uniforme. Isto justifica os valores de tensão disruptiva das configurações condutor-plano serem maiores do que a configuração haste-plano em tensão alternada e impulso de polaridade positiva, como será visto no próximo capítulo.

Em todas as configurações o campo decresce com a distância em direção ao plano. Entretanto, observa-se que o campo é maior junto à haste e maior no plano aterrado no caso dos condutores, ambos considerando a mesma distância.

Para a distância de 1 cm a intensidade máxima de campo não varia muito com o aumento do espaçamento, mas a intensidade mínima, no plano, diminui com o aumento do espaçamento.

A ponta 2, em relação às pontas, produz a distribuição mais uniforme de campo, sendo a intensidade de campo na haste menor e no plano maior do que das demais pontas, já a ponta 4, produz a distribuição menos uniforme. Isso porque a ponta 2 possui uma geometria de raio maior do que as demais pontas e a ponta 4 a geometria mais aguda.

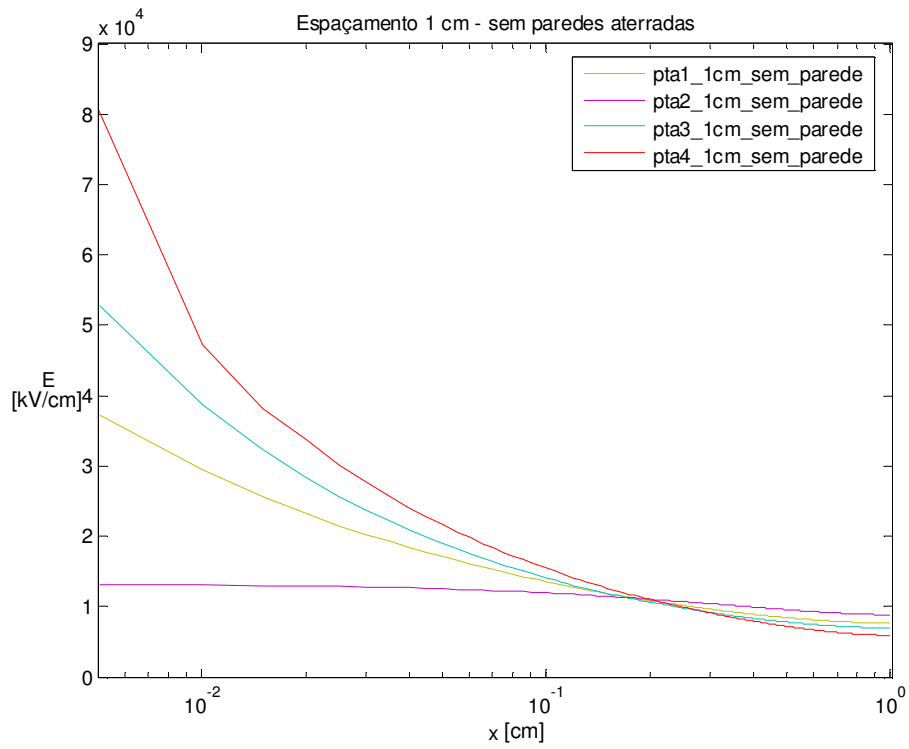


Figura 4.5 - Todas as pontas com espaçamento de 1 cm ao ar livre

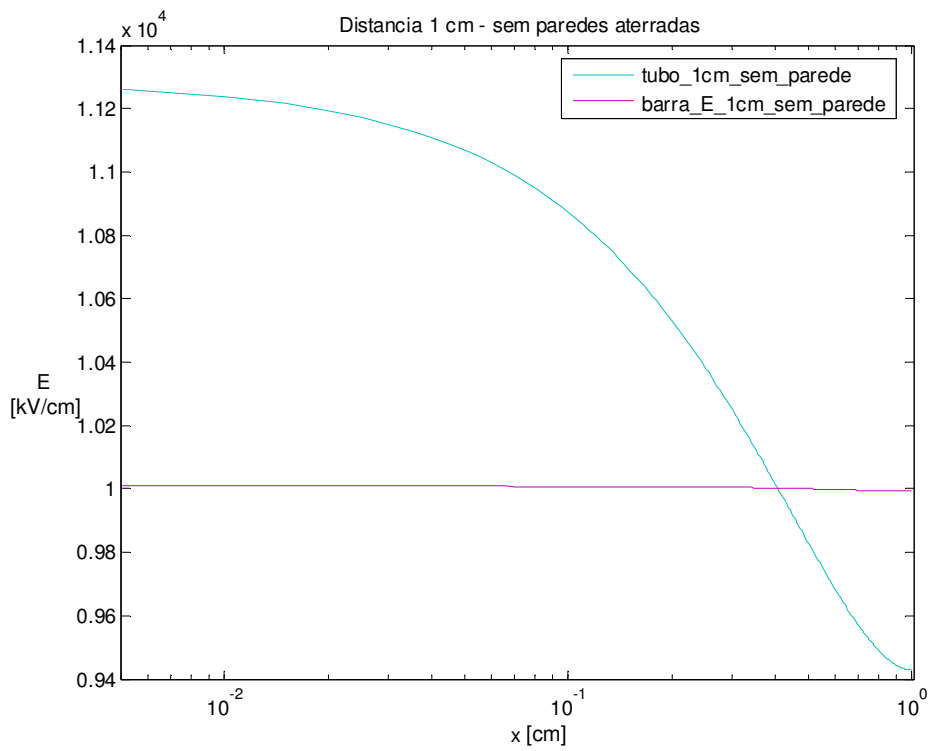


Figura 4.6 - Tubo e barra com espaçamento de 1 cm ao ar livre

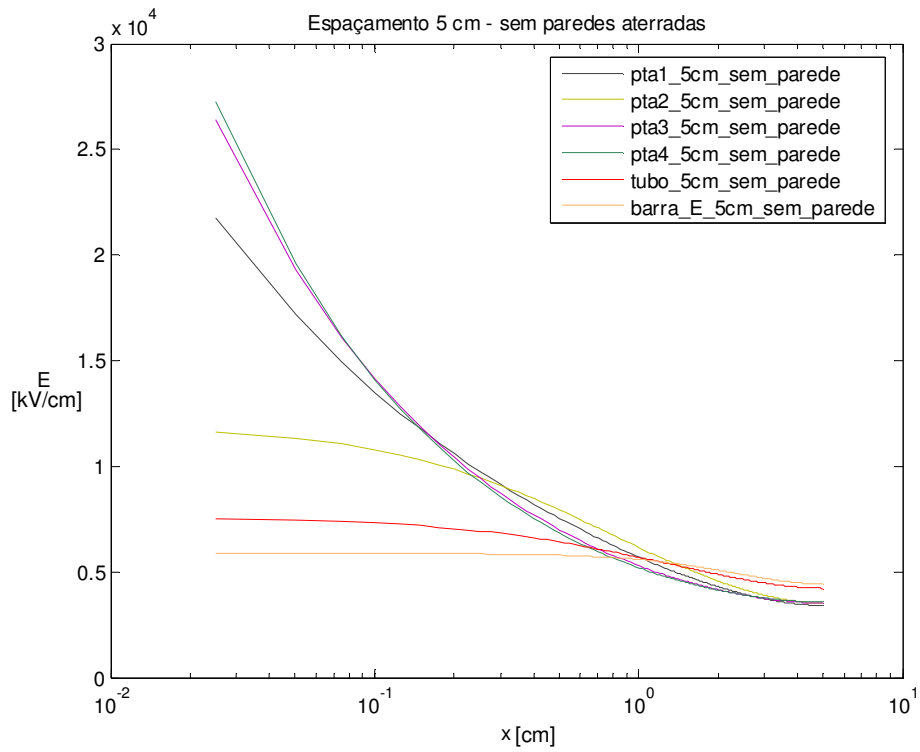


Figura 4.7 - Todas as configurações com espaçamento de 5 cm ao ar livre

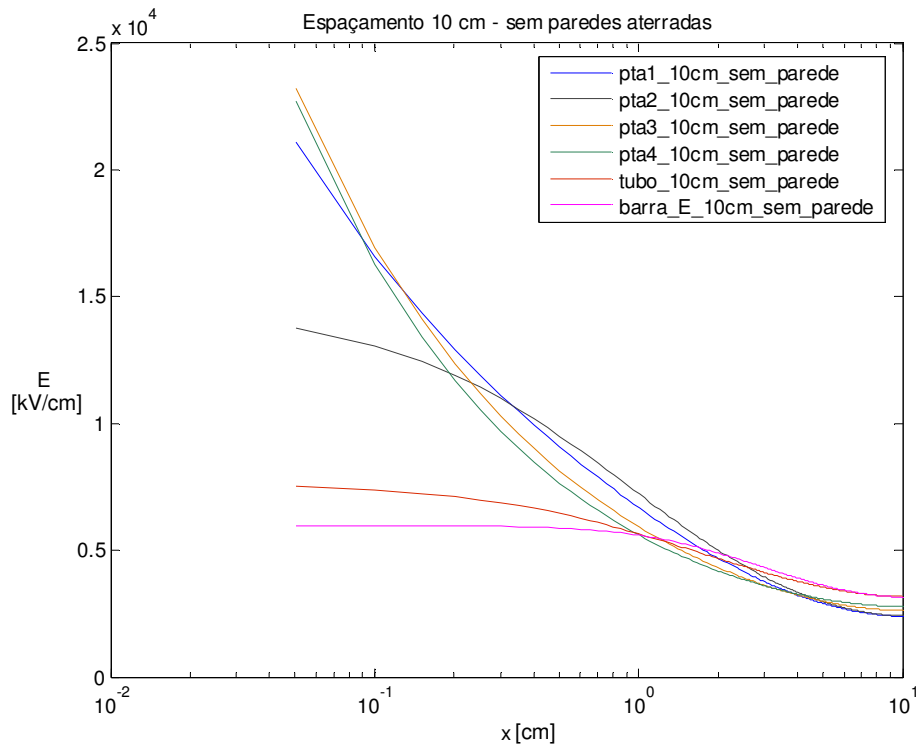


Figura 4.8 - Todas as configurações com espaçamento de 10 cm ao ar livre

Os gráficos das figuras 4.9 a 4.13 mostram os resultados das simulações com e sem paredes metálicas ao redor dos eletrodos, mais figuras mostrando esta comparação estão no anexo D. A distância entre as paredes e a haste, que suporta as pontas, é igual ao espaçamento em cada simulação, anexos A e G.

A distribuição de campo elétrico dos espaçamentos com paredes metálicas, comparada com a dos espaçamentos sem as paredes, apresentam valores de campo mais intensos próximo aos eletrodos, sendo esta intensidade dependente da geometria da ponta, e valores menores próximo ao eletrodo plano.

A diferença entre os valores obtidos com a barra e o tubo, com a distância de 1 cm do plano, foram mínimas, como pode ser visto nas figuras 4.12 e 4.13.

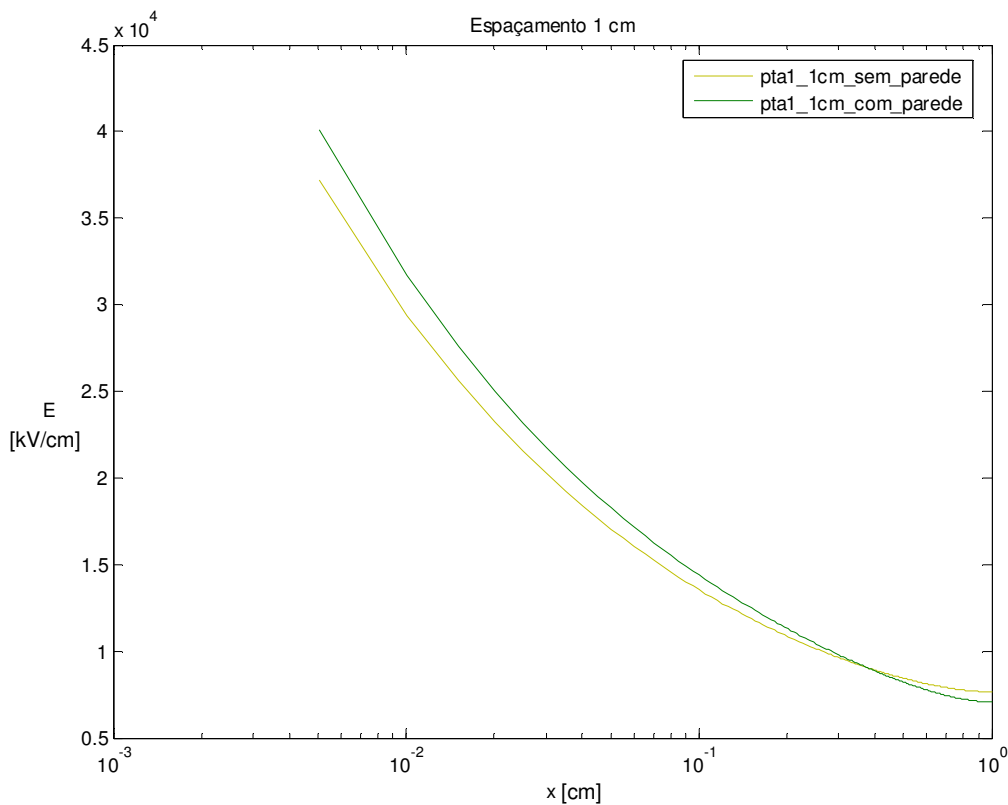


Figura 4.9 - Ponta 1 com espaçamento de 1 cm com e sem paredes aterradas

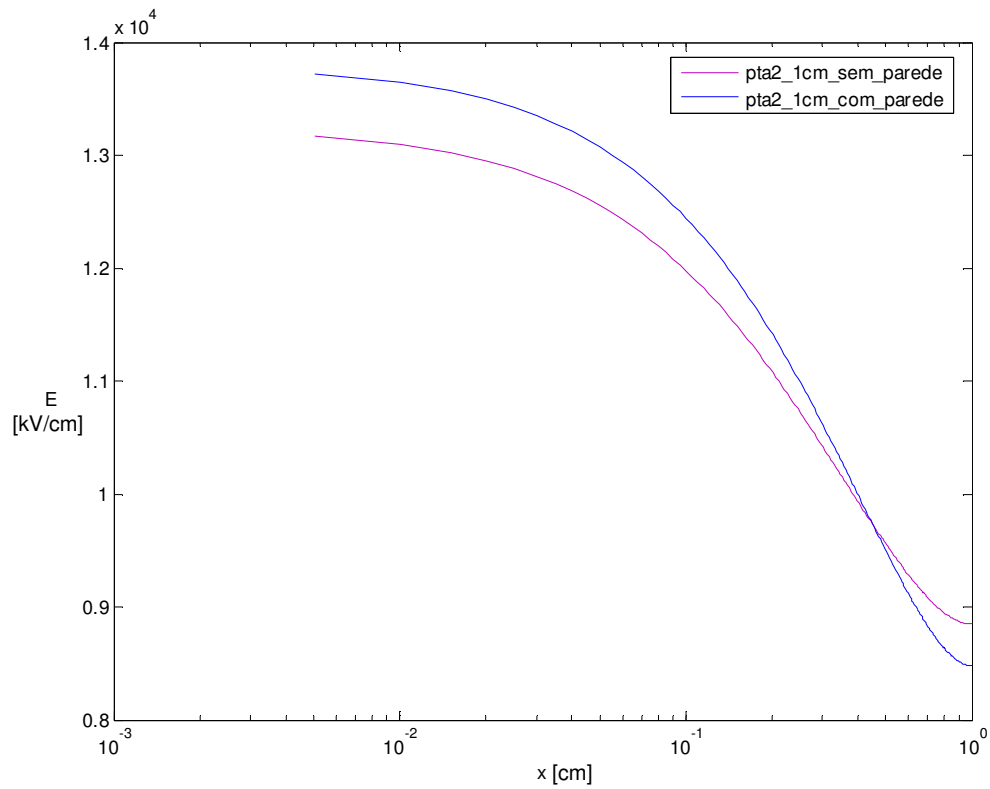


Figura 4.10 - Ponta 2 com espaçamento de 1 cm com e sem paredes aterradas

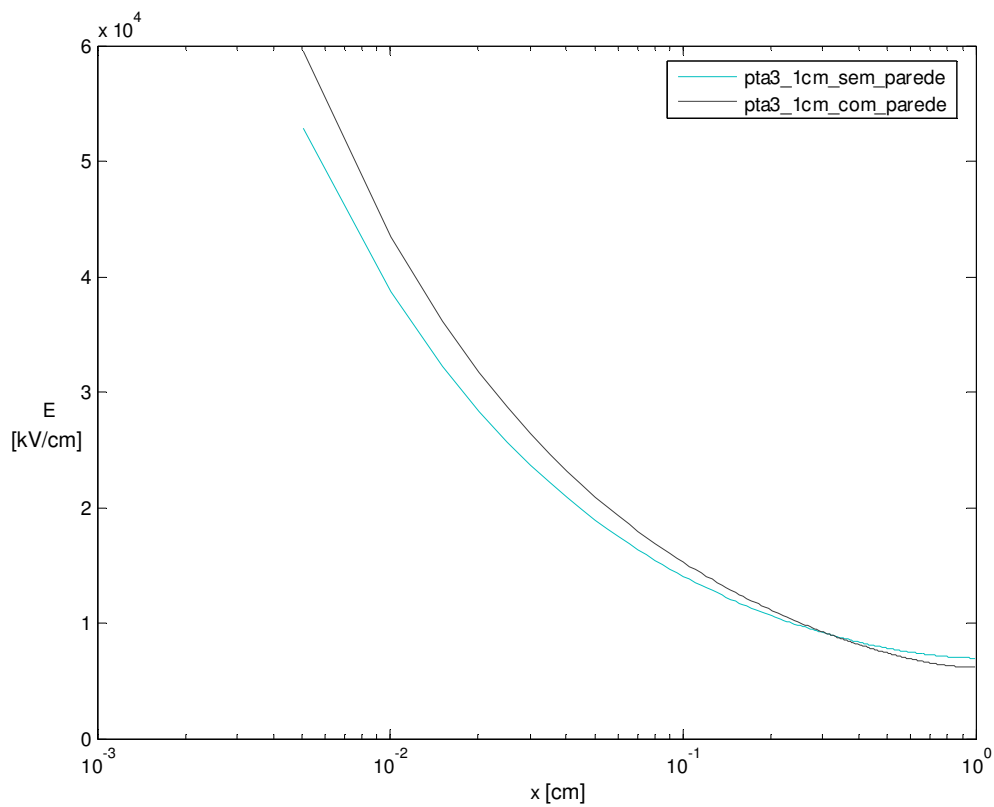


Figura 4.11 - Ponta 3 com espaçamento de 1 cm com e sem paredes aterradas

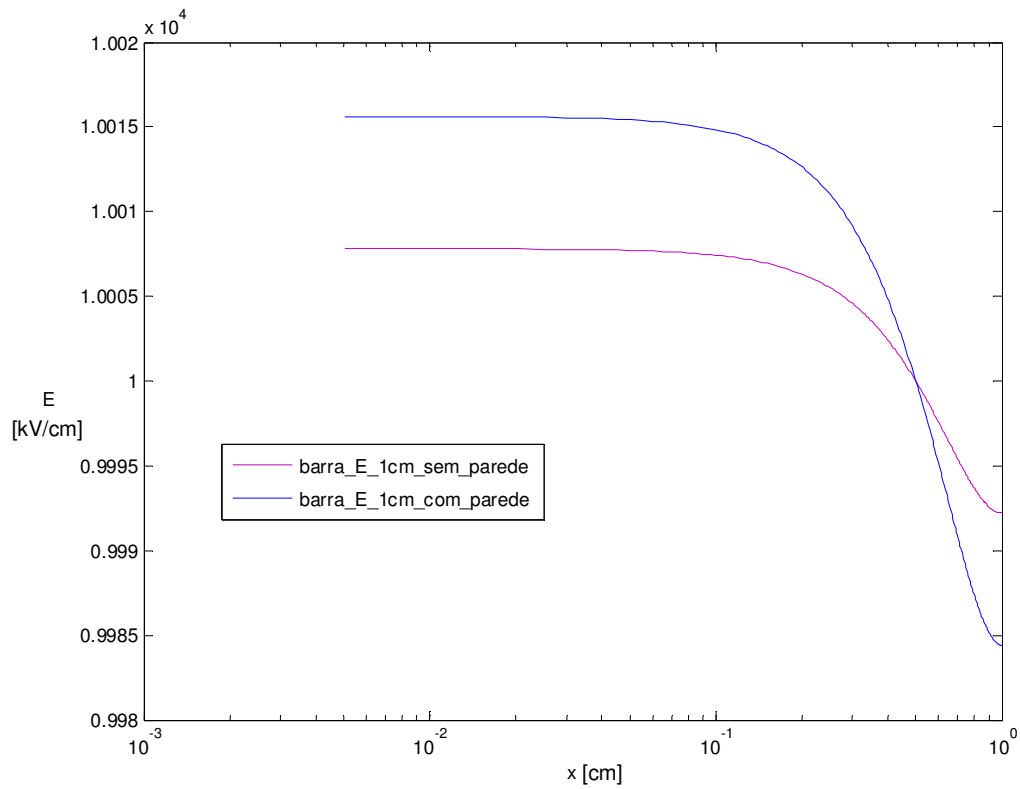


Figura 4.12 - Barra com espaçamento de 1 cm com e sem paredes aterradas

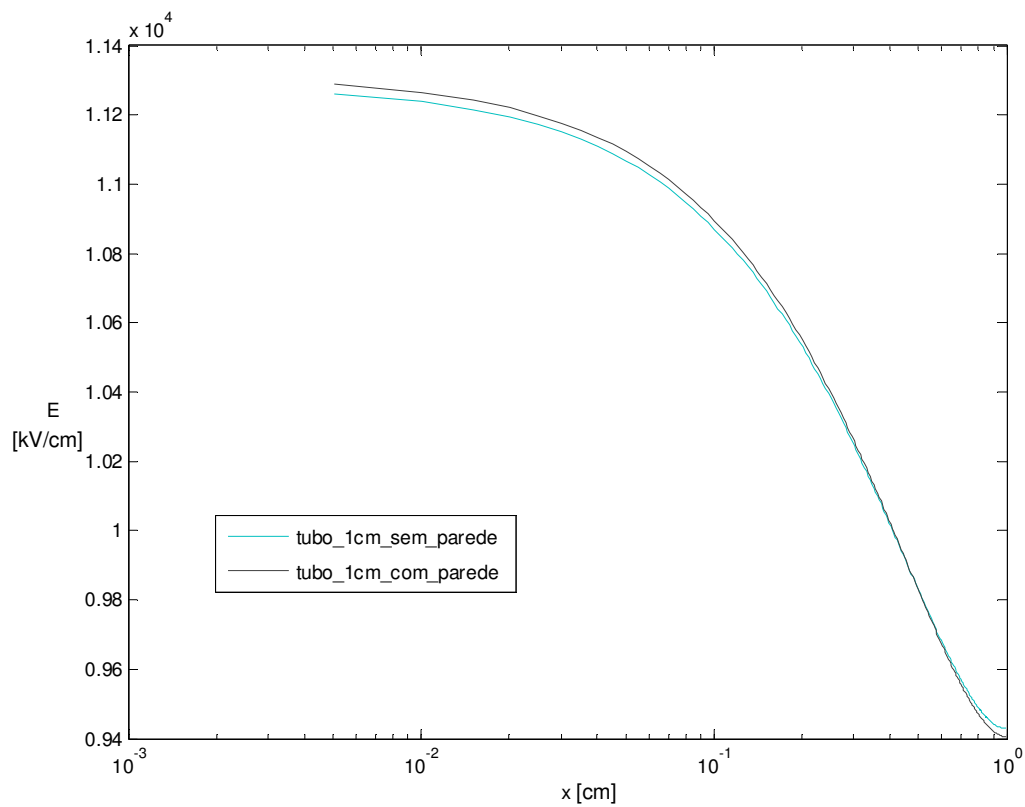


Figura 4.13 - Tubo com espaçamento de 1 cm com e sem paredes aterradas

Uma maneira de analisar estes resultados é quantificar a uniformidade ou a não uniformidade da distribuição de campo elétrico de um espaçamento.

A não uniformidade de campo em um espaçamento pode ser calculada pela integral:

$$\int_0^{x_i} E(x)dx = F_i \quad (4.7)$$

onde a área  $F_i$  é numericamente igual ao potencial à distância  $x_i$ , o campo  $E(x_i)$  tem valor igual ao de um campo homogêneo produzido por placas paralelas submetidas à mesma diferença de potencial  $U$  e com o mesmo espaçamento entre os eletrodos  $d$ . Quanto maior  $F_i$  menor é a não uniformidade do campo no espaçamento.

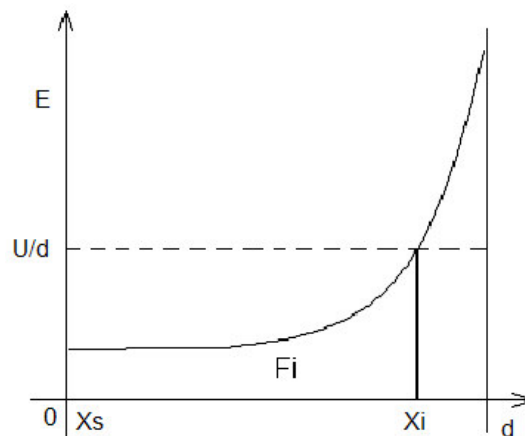


Figura 4.14 - Distribuição de campo ao longo do espaçamento com ponto de interseção com a respectiva distribuição uniforme.

A uniformidade do campo no espaçamento pode ser calculada por :

$$\int_0^{x_s} E(x)dx = F_s \quad (4.8)$$

sendo  $x_s$  a posição com menor valor de campo elétrico.  $F_s$  representa a perda de campo elétrico na região do espaçamento mais importante para o desenvolvimento da descarga.

Quanto maior o campo no eletrodo energizado mais propícia é a formação da descarga e quanto maior a diferença entre os potenciais  $F_i$  e  $F_s$  melhor é o desenvolvimento da descarga pelo espaçamento [20].

Essas integrais foram calculadas para o caso da ponta 3 com 1 cm de espaçamento. Essa distribuição serve como exemplo para as outras pontas, pois todas têm o mesmo comportamento.

O valor de  $F_i$  para o caso sem parede é aproximadamente  $8,83 \times 10^{+3}$  V e para o caso com parede é aproximadamente  $8,42 \times 10^{+3}$  V. O valor de  $F_s$  para ambos os casos é igual a 0 V. A diferença entre os valores de  $F_i$  para os casos acima é 410,14 V.

A partir destes valores pode-se concluir que as configurações com a presença da parede possuem uma distribuição de campo mais não uniforme além de possuírem uma distribuição que propicia o desenvolvimento da descarga.

Com o resultado teórico das simulações indicando que a presença de partes metálicas aterradas ao redor dos eletrodos modifica a distribuição de campo elétrico das configurações tornando-as mais não uniformes e considerando os fundamentos teóricos sobre física da descarga apresentados anteriormente, espera-se observar, nos resultados experimentais apresentados a seguir, a mesma influência da presença das partes metálicas nos valores de tensão disruptiva.



## **5 - IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo será apresentado todo o processo de implementação experimental dos ensaios realizados, desde seus preparativos aos resultados obtidos. Vão ser apresentadas as justificativas para o que foi feito, a descrição dos itens de ensaio, como foram realizados os ensaios e a análise dos resultados.

### **5.1 - JUSTIFICATIVAS**

Antes dos ensaios, foi pesquisado na literatura o que seria necessário para realizá-los e para cumprir o objetivo deste trabalho. A seguir serão apresentadas as informações mais importantes sobre a escolha dos itens de ensaio e os ensaios realizados.

#### **5.1.1 - ITENS DE ENSAIO**

Os eletrodos foram escolhidos com a finalidade de facilitar o estudo da suportabilidade dielétrica no ar, guardando alguma representatividade ou possível correlação com formas e configurações encontradas na prática. Os eletrodos são de geometria bem definida, possibilitando conhecer a distribuição de campo elétrico ao longo do espaçamento. Observa-se que normalmente somente uma região do material isolante está submetida ao campo elétrico máximo, então os eletrodos são usados para representar estas regiões de  $E_{max}$ . Isto reduz os custos da montagem e o tempo de ensaio por ser um arranjo mais simples, além de quase sempre reduzir os valores de tensão necessários para o ensaio.

Como nos trabalhos anteriores não existia um padrão de eletrodos ensaiados ou muitas vezes utilizavam-se diversos tipos, decidiu-se utilizar quatro pontas distintas em geometria, uma barra e um tubo. A influência de cada uma delas na tensão obtida será objeto de análise.

Além dos eletrodos tipo ponta, também foram ensaiados condutores, em forma de barra e tubo, e isoladores utilizados nos cubículos. As barras são usualmente os condutores utilizados em cubículos. O tubo foi ensaiado nas mesmas configurações

que a barra no intuito de saber qual seria a influência sobre a tensão disruptiva se a barra fosse substituída pelo tubo.

### **5.1.2 – ENSAIOS REALIZADOS**

Neste item vão ser apresentadas algumas justificativas para a escolha dos ensaios a que foram submetidos os eletrodos e demais itens sob ensaio.

Todas as decisões e suposições feitas para os ensaios foram baseadas no fato de que uma das finalidades deste trabalho é pesquisar o valor das tensões disruptivas ou suportáveis em diversas configurações de eletrodos, para servirem como base para projetos e melhorias em equipamentos que atendem até o nível tensão de sistemas de distribuição.

Sendo assim, considerando os tipos de tensões que podem ocorrer no sistema ao qual os equipamentos são ligados e os tipos de ensaios dielétricos normalizados para determinação da tensão suportável e tensão disruptiva, os ensaios foram feitos com tensão senoidal de frequência industrial (60Hz) e com impulso de tensão atmosférico normalizado, em ambas as polaridades.

Não foi feito ensaio com impulso de tensão de manobra pois, segundo a norma NBR6939 [18], este cabe apenas para equipamentos com classe de tensão superior a 245 kV.

Os ensaios foram divididos em duas partes. A primeira parte foi dedicada aos estudos das configurações de eletrodos ao ar livre, para determinar as curvas de tensão disruptiva em função dos espaçamentos. Foi criada uma equação que relaciona os valores de  $U_{50\%}$  com os espaçamentos, para impulso atmosférico de polaridade positiva. Esta equação e os resultados obtidos foram comparados com os valores encontrados na bibliografia.

A segunda parte dos ensaios foi repetir os ensaios com as configurações em ambiente confinado, utilizando um protótipo de cubículo e um arranjo de paredes móveis. Os resultados obtidos nesta segunda parte servem para serem comparados com os resultados ao ar livre.

## 5.2. ARRANJOS DE ENSAIO

O transformador utilizado nos ensaios possui relação de transformação de 440V / 230kV e sua potência é 100 kVA. O controle da tensão é feito por um regulador de tensão que varia de 0 a 440 V, com potência compatível com a do transformador.

O transformador é protegido contra sobrecorrente por um resistor d'água conectado à sua saída de alta tensão e também por um dispositivo de detecção de tensão disruptiva, desenvolvido no CEPEL. O resistor serve para limitar a corrente no momento da descarga disruptiva. O valor do resistor é de aproximadamente  $3M\Omega$  e o dispositivo de detecção de tensão disruptiva desliga o circuito que alimenta o transformador imediatamente ao primeiro sinal de disrupção, figura 5.1.

O gerador de impulso utilizado tem capacidade de 1 MV, formado por dez estágios de 100 kV. Cada estágio tem dois capacitores de 600 nF. O resistor de frente externo, que pode variar de 0 a 1 k $\Omega$ , possibilita o ajuste da forma de onda quando o arranjo de ensaio é modificado, figura 5.2.

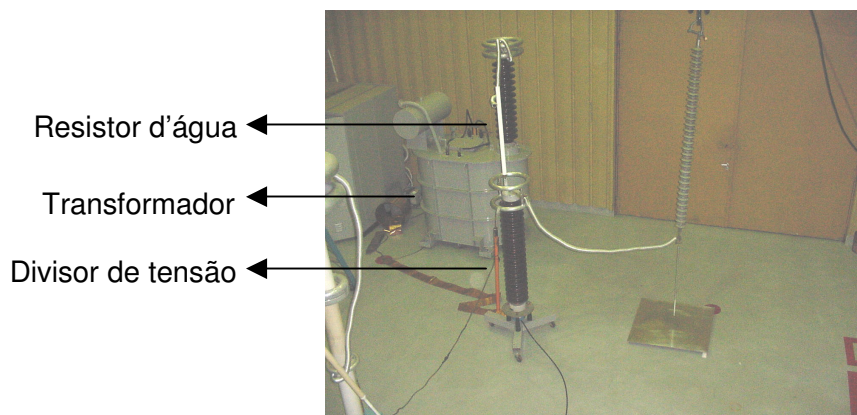


Figura 5.1 – Arranjo de ensaio com tensão alternada

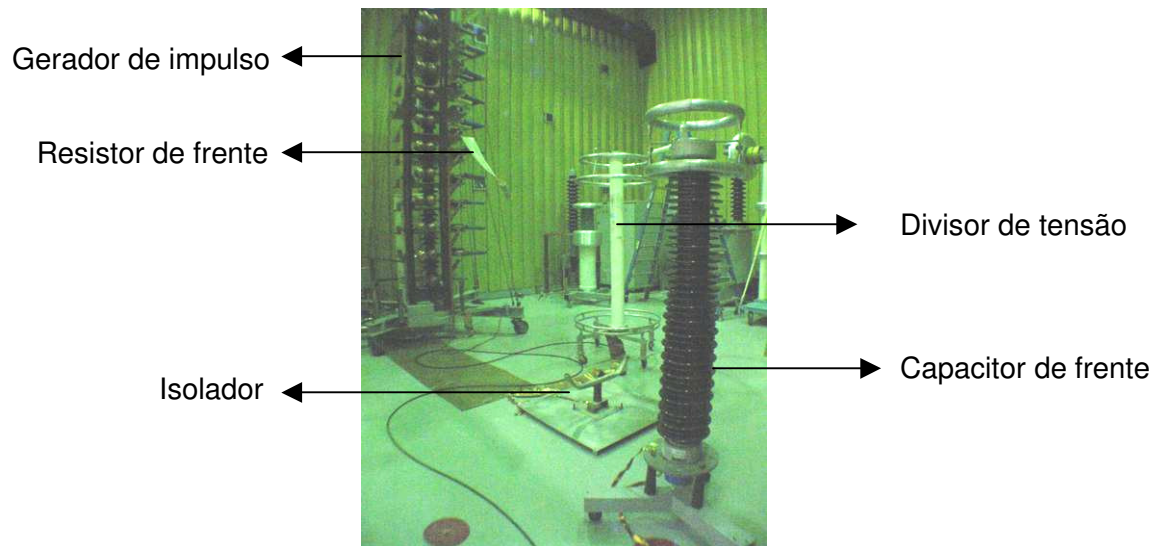


Figura 5.2 – Arranjo de ensaio de IA com isolador

Os eletrodos ensaiados foram descritos anteriormente no capítulo 4, figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Os isoladores ensaiados estão mostrados na figura 5.3 e foram identificados por números de 1 a 4 em ordem crescente de altura. A altura, que tem o mesmo valor da distância de arco a seco, de cada um é 130mm, 150mm, 175mm e 210mm.



Figura 5.3 – Isoladores ensaiados

As figuras 5.4 e 5.5 mostram alguns detalhes internos de cubículos de classe de tensão 15kV. Essas figuras mostram o isolador e sua fixação, o tipo de barra e conexões e os espaçamentos existentes entre fase e terra.



Figura 5.4 – Foto de um cubículo, isoladores e barras

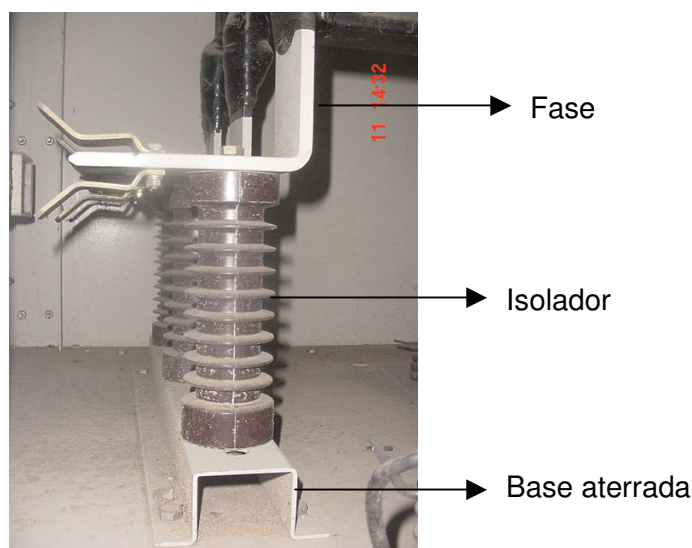


Figura 5.5 – Foto de um isolador instalado dentro de um cubículo

### 5.3 – PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS

Os ensaios, no que se refere ao procedimento de montagem do arranjo e medição, seguiram as respectivas normas técnicas de Alta Tensão [9, 11, 22 e 23]. A montagem dos itens sob ensaio são as peculiaridades deste trabalho e serão descritas abaixo.

Os ensaios ponta-plano e condutor-plano foram realizados com uma haste feita de alumínio de seção circular de 19mm de diâmetro e 1,5m de comprimento, sustentada

verticalmente por um isolador polimérico acima do plano, figura 5.6. As pontas e os condutores são conectados à extremidade da haste por meio de rosca.



Figura 5.6 – Arranjo ponta-plano para ensaio ao ar livre

Os ensaios ao ar livre foram feitos sobre uma placa metálica de alumínio de aproximadamente  $1\text{m}^2$  servindo como plano, que se manteve aterrada durante os ensaios. Sobre a placa foram ensaiados as pontas, o tubo, a barra e os isoladores fixados a uma base.

A simulação do caso de isolamento interna dos equipamentos foi feita com uma estrutura em chapas de alumínio no formato de um cubo,  $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ . A chapa de uma das faces foi substituída por uma grade metálica para possibilitar acompanhar visualmente os ensaios, figuras 5.7 e 5.8. A caixa também se manteve sempre aterrada. A forma de se sustentar a haste foi igual à utilizada nos ensaios ao ar livre mantendo-a sempre no centro da estrutura.

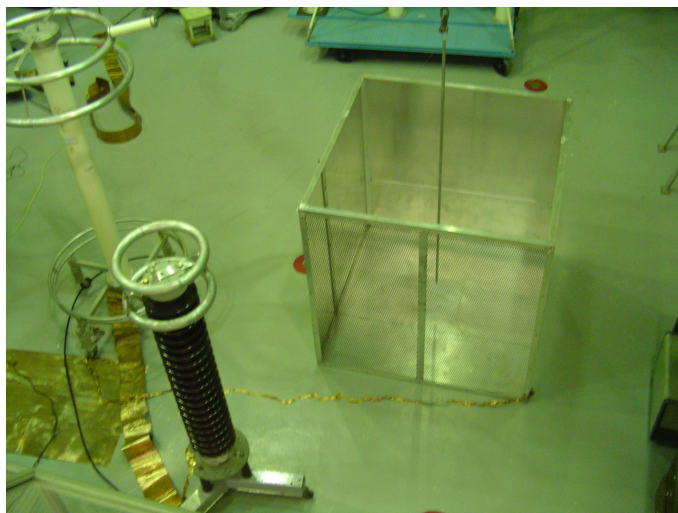


Figura 5.7 – Ensaio ponta-plano dentro da caixa metálica

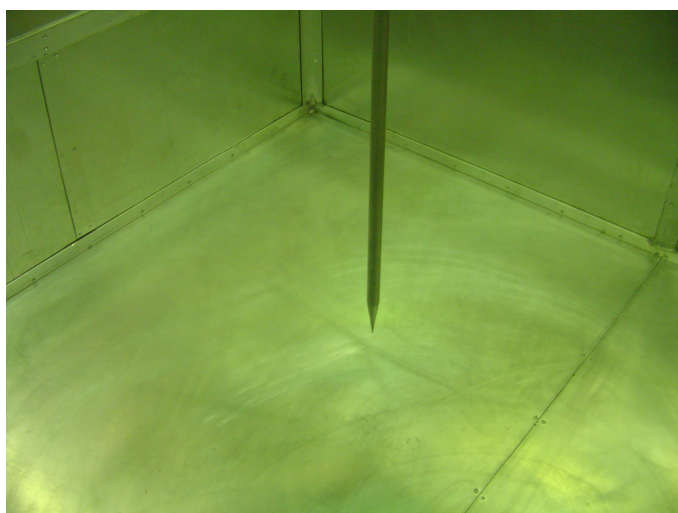


Figura 5.8 – Detalhe da configuração ponta-plano dentro da caixa metálica

Os espaçamentos de 2,5cm até 15cm, mais encontrados em cubículos, foram ensaiados com quatro paredes metálicas ao seu redor, figuras 5.9 e 5.10. Diferentemente da caixa metálica, citada anteriormente, este arranjo possui as quatro paredes móveis. Os ensaios foram realizados com as paredes fixadas a uma determinada distância da haste: 10 cm, 12,5 cm e 15 cm, e os espaçamentos variados até o espaçamento entre os eletrodos se igualar à distância da parede. Este arranjo permite observar a influência na suportabilidade dielétrica do arranjo da variação da distância entre as paredes e a haste.

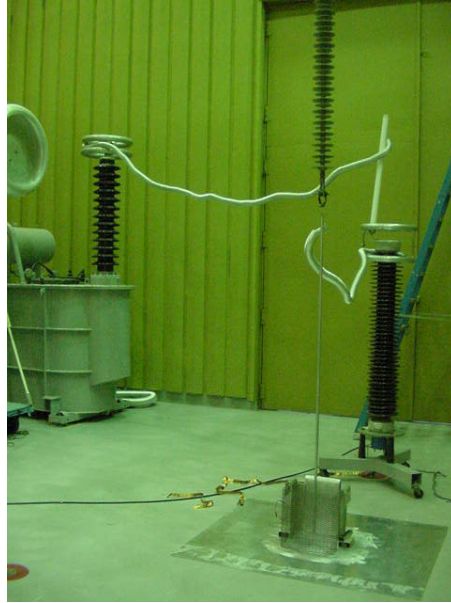


Figura 5.9 – Arranjo de ensaio com as paredes metálicas na configuração ponta-plano

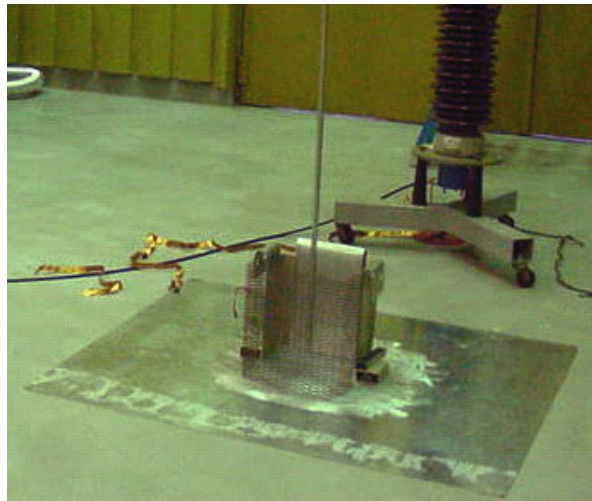


Figura 5.10 – Detalhe da configuração ponta-plano com as paredes metálicas móveis

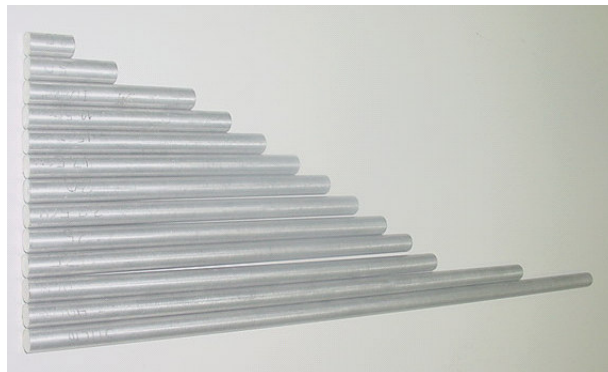


Figura 5.11 – Gabaritos de todos os espaçamentos ensaiados



Os espaçamentos ensaiados foram medidos com o auxílio de gabaritos feitos de alumínio, figura 5.11.

Os isoladores quando ensaiados ao ar livre foram colocados em cima de uma chapa metálica aterrada e quando simulando a interferência das paredes metálicas foram colocados dentro da caixa metálica aterrada. Como as dimensões da caixa são bem maiores do que a altura dos isoladores, uma das dimensões da caixa foi diminuída com uma parede móvel no seu interior. Isso possibilitou uma melhor avaliação da influência das paredes na tensão disruptiva. As dimensões ao redor dos isoladores foram 1,5m no sentido dos eletrodos, barra ou tubo, e 1,0m no sentido perpendicular.

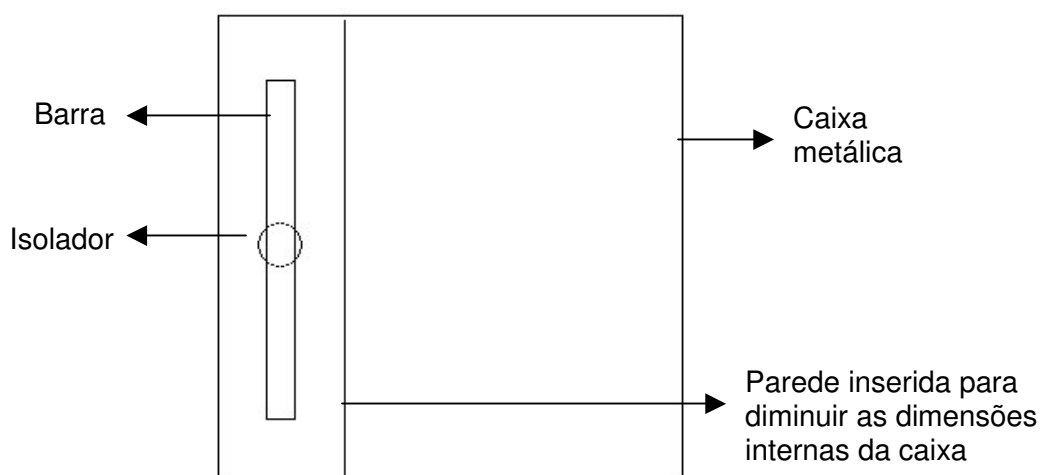


Figura 5.12 – Esquema do arranjo de ensaio dos isoladores dentro da caixa metálica

A figura 5.13 mostra um isolador, montado na base, sendo ensaiado na condição ar livre.

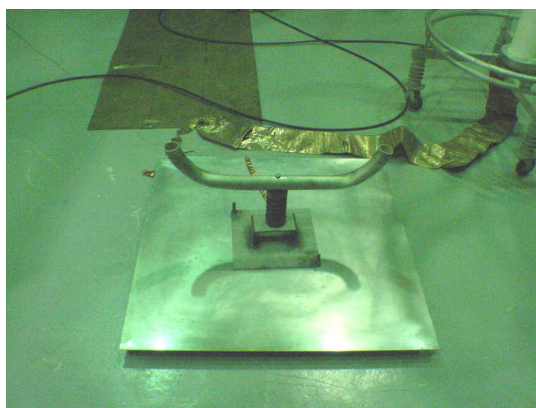


Figura 5.13 – Detalhe do ensaio com isolador

## 5.4 - RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios em laboratório. Os resultados estão em gráficos de tensão em função do espaçamento e tabelas com os valores de tensão para as configurações de eletrodos ensaiadas.

O resultado de cada configuração de eletrodo ensaiada é um valor de tensão disruptiva para cada espaçamento. Estes resultados são obtidos pelos métodos de ensaios citados em 3.1.4.

Os valores de tensão apresentados são os valores de tensão suportável de impulso atmosférico,  $U_{10\%}$ , ou de tensão de descarga disruptiva a 50%,  $U_{50\%}$ . Todos em ambas polaridades. Os resultados de tensão alternada apresentados são os valores de tensão disruptiva.

A tensão correspondente a 10% de probabilidade de descarga disruptiva ( $U_{10\%}$ ), pode ser determinada usando-se métodos estatísticos que permitem determinar o valor de  $U_{10\%}$  diretamente a partir do valor de  $U_{50\%}$  com a seguinte relação [9]:

$$U_{10\%} = U_{50\%} \times (1 - 0,04) \quad (5.1)$$

Os valores de  $U_{10\%}$  podem ser comparados com os valores de tensão suportável nominal de equipamentos de alta tensão e também são os valores encontrados nas normas técnicas brasileiras. No caso de um ensaio de aprovação de algum equipamento, este será aprovado se o valor obtido de  $U_{10\%}$  não for inferior ao valor de tensão suportável nominal especificado para o equipamento. Os gráficos com os resultados de  $U_{10\%}$  estão no apêndice D.

Alguns gráficos apresentam resultados desconsiderando os valores que possuem o valor da relação  $h/\delta$  maiores ou iguais  $15 \text{ g/m}^3$ , estes gráficos estão no anexo E. Pode-se observar que nos gráficos onde foram mantidos, os valores obtidos com  $h/\delta \geq 15 \text{ g/m}^3$  estão coerentes com os outros valores, por isso também foram considerados.

Os valores de incerteza de medição associada a cada valor apresentado, tanto para tensão de impulso atmosférico quanto para tensão alternada, estão apresentados abaixo:

Incerteza para IA pleno:

Incerteza no valor de crista =  $VL \pm 1,62 \%$

Onde: VL = Tensão medida.

Tensão alternada:

Incerteza para tensão alternada =  $VL \pm 0,58 \%$

Onde: VL = Tensão medida.

As informações acima foram obtidas dos certificados de calibração dos sistemas de medição utilizados nos ensaios. A calibração foi feita pelo CEPEL em seu Laboratório de Referência de Alta Tensão.

#### **5.4.1 - ENSAIOS DE IMPULSO ATMOSFÉRICO**

Primeiramente vão ser apresentados os resultados ao ar livre de todas as configurações e após estes serão confrontados com os respectivos resultados obtidos dentro do cubículo.

##### **5.4.1.1 – ENSAIOS AO AR LIVRE**

Foram traçadas, junto com os gráficos, curvas com o intuito de ajudar na visualização das grandezas e, não com a intenção de se criar tendência para extrapolar os resultados além dos limites de espaçamentos de eletrodos ensaiados.

Os ajustes dos gráficos, das configurações haste-plano, de impulso atmosférico são ajustes por mínimos quadrados de uma função do tipo  $y = x^a$  para a polaridade negativa e linear  $y = ax+b$  para a polaridade positiva.

Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 1 ao ar livre estão na figura 5.14.

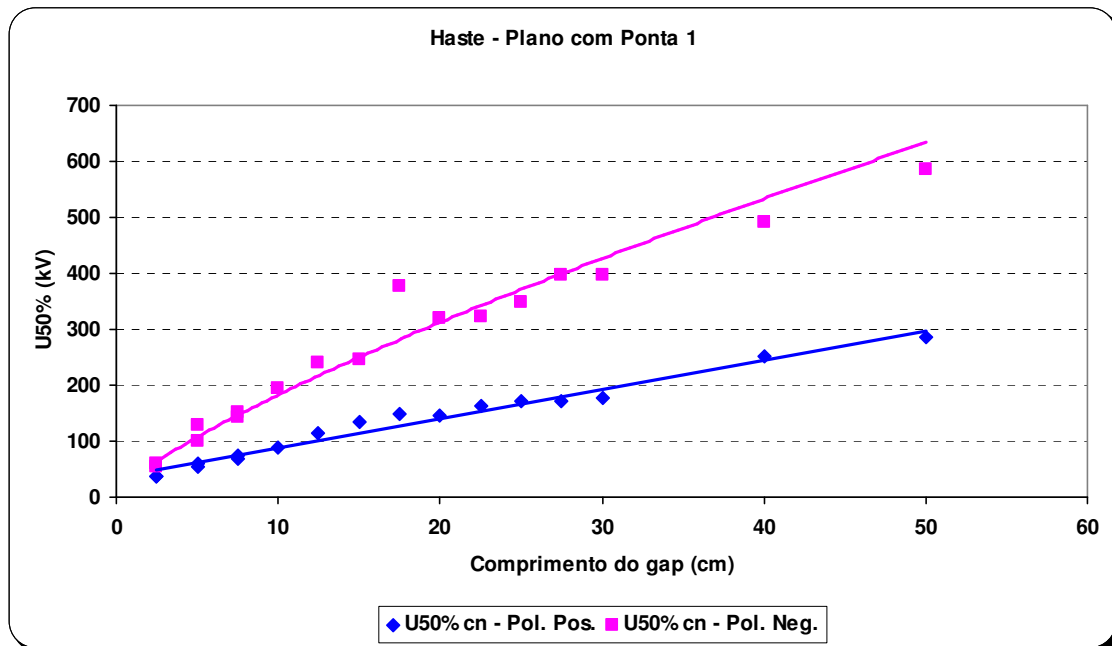


Figura 5.14 - Configuração haste-plano com a ponta 1, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 2 ao ar livre estão na figura 5.15.

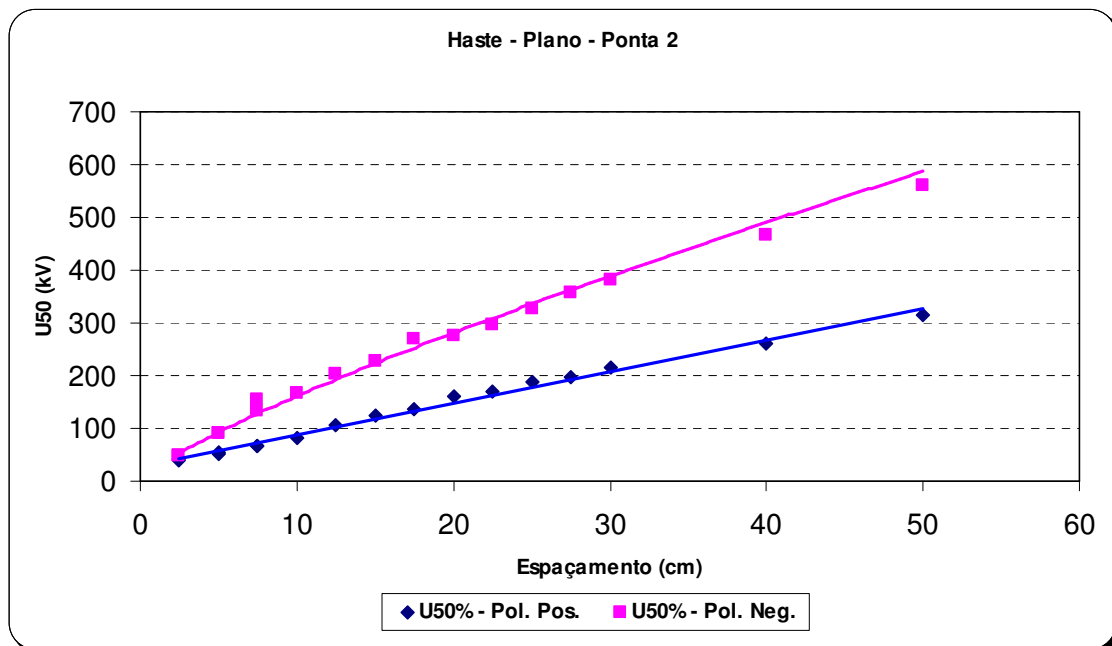


Figura 5.15 - Configuração haste-plano com a ponta 2, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 3 ao ar livre estão na figura 5.16.

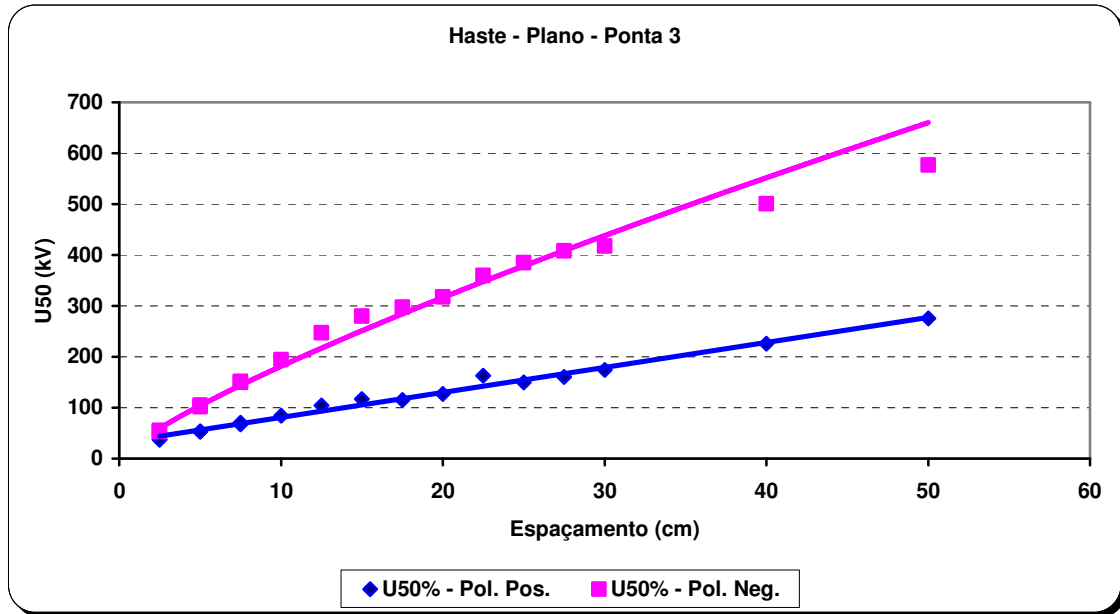


Figura 5.16- Configuração haste-plano com a ponta 3, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 4 ao ar livre estão na figura 5.17.

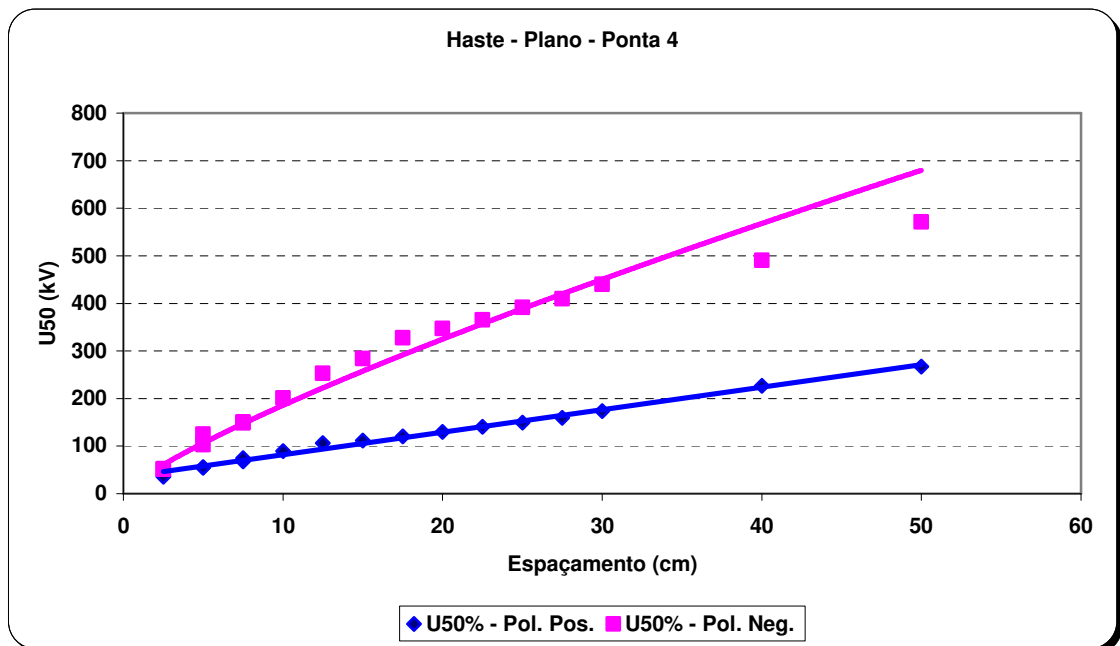


Figura 5.17 - Configuração haste-plano com a ponta 4, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração barra-plano ao ar livre estão na figura 5.18. Neste gráfico as curvas de traçadas foram do tipo linear para as duas polaridades.

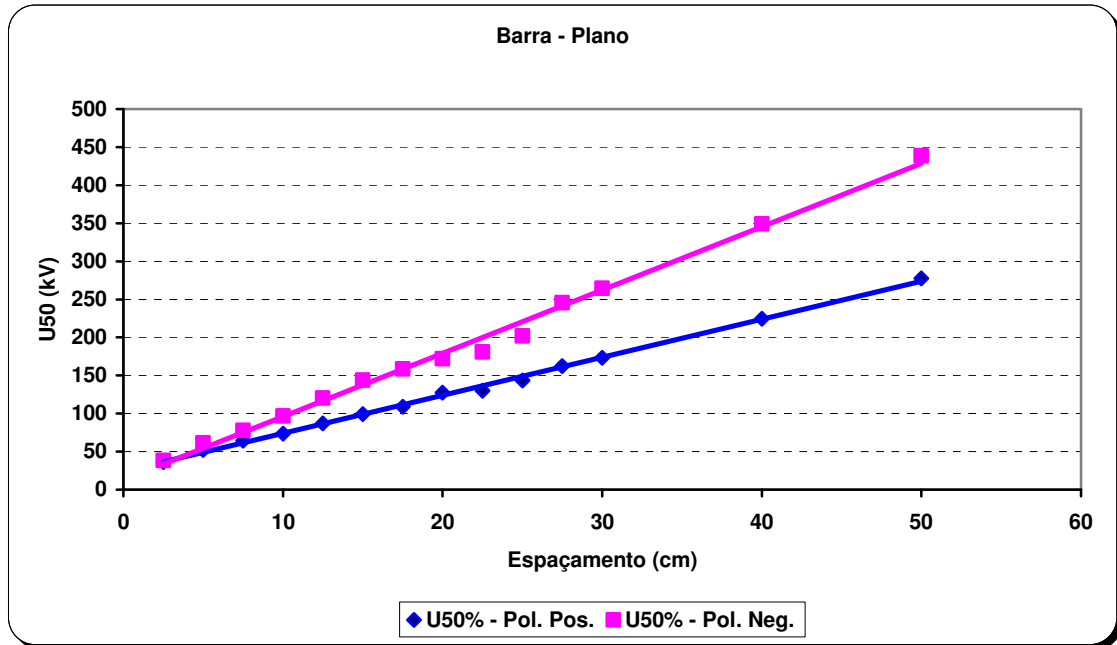


Figura 5.18 - Configuração barra-plano, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração tubo-plano ao ar livre estão na figura 5.19. O ajuste dos resultados obtidos para as duas polaridades foi do tipo  $y = x^a$ .

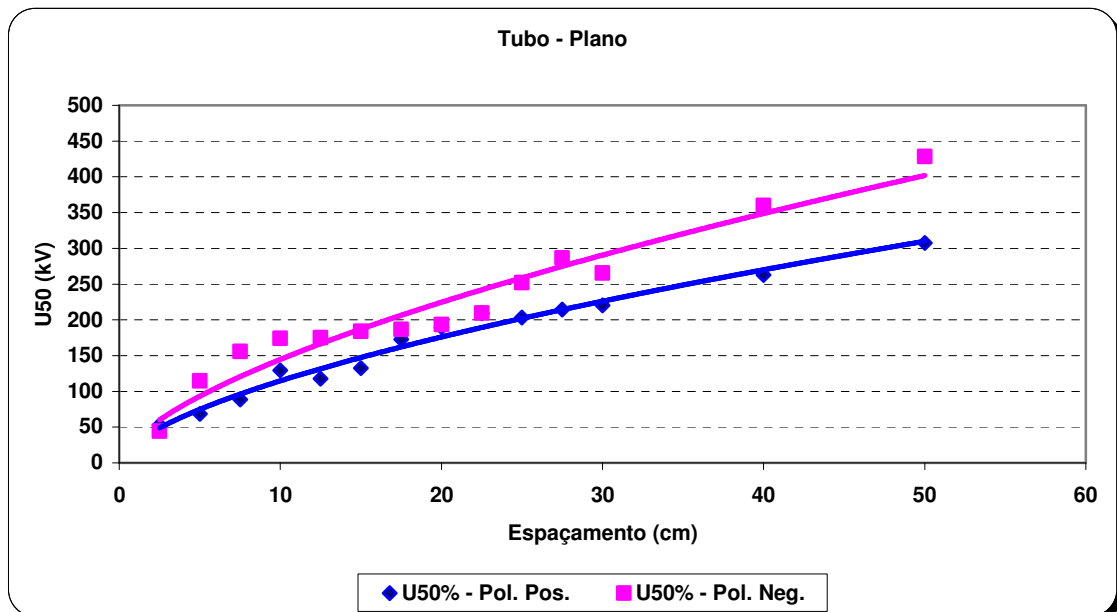


Figura 5.19 - Configuração tubo-plano, tensão de impulso atmosférico

Os resultados de polaridade positiva da configuração haste-plano com as pontas 3 e 4, figuras 5.16 e 5.17, variam linearmente com os espaçamentos. Entretanto os resultados de polaridade negativa não são lineares, têm um crescimento mais acentuado para os espaçamentos menores e depois esta tendência diminui, para os maiores espaçamentos.

Os resultados obtidos com a configuração barra-plano de polaridade positiva e negativa variam linearmente com os espaçamentos, ao contrário da configuração haste-plano, os resultados de polaridade negativa não têm a tendência de diminuir a taxa de crescimento com a distância entre os eletrodos, estes resultados estão na figura 5.18.

Os resultados obtidos com a configuração tubo-plano, figura 5.19, foram bastante não lineares em relação ao crescimento do espaçamento entre os eletrodos. Outra característica observada é que para esta configuração a diferença entre os resultados de polaridade positiva e negativa foi menor do que a observada nas outras configurações. Como é uma configuração que possui uma distribuição de campo mais uniforme, o efeito de polaridade é menor, pois sofre menos influência dos volumes de cargas formados no processo de descarga.

Esses valores apresentados até aqui foram valores de tensão obtidos com os eletrodos ao ar livre numa faixa de espaçamento entre os eletrodos variando de 1 cm a 50 cm. Nas figuras a seguir é apresentado um resumo de todos os valores obtidos com as quatro pontas ao ar livre com tensão de impulso atmosférico, separados pela polaridade. A figura 5.20 apresenta os valores de polaridade positiva e a figura 5.21 apresenta os valores de polaridade negativa.

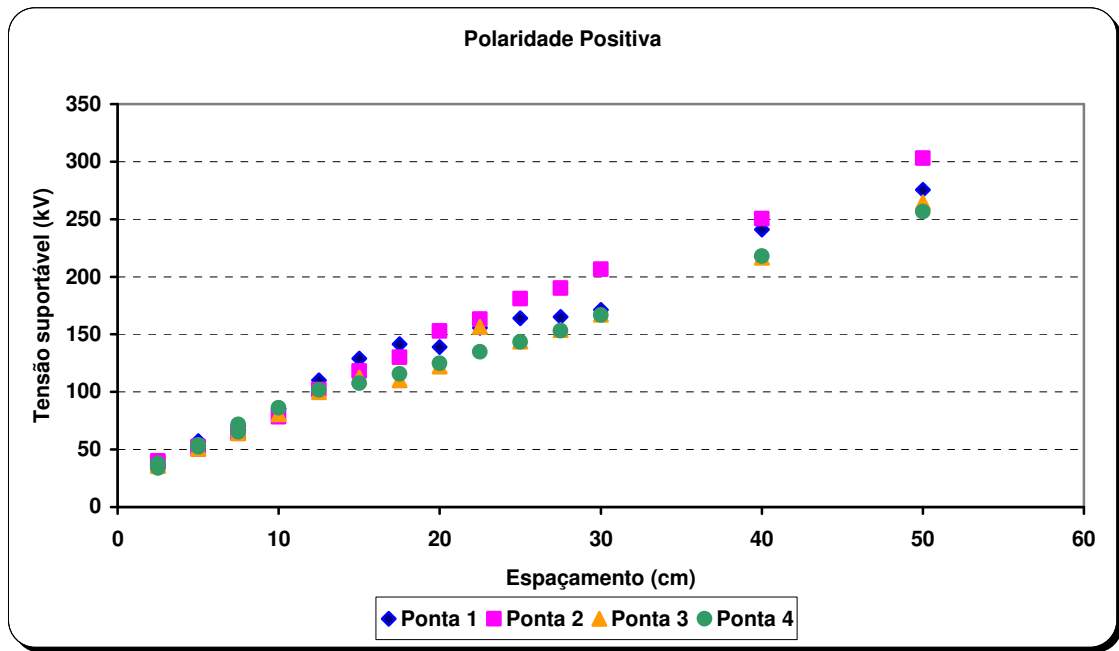


Figura 5.20 - Todas as configuração haste-plano, tensão de impulso atmosférico de polaridade positiva

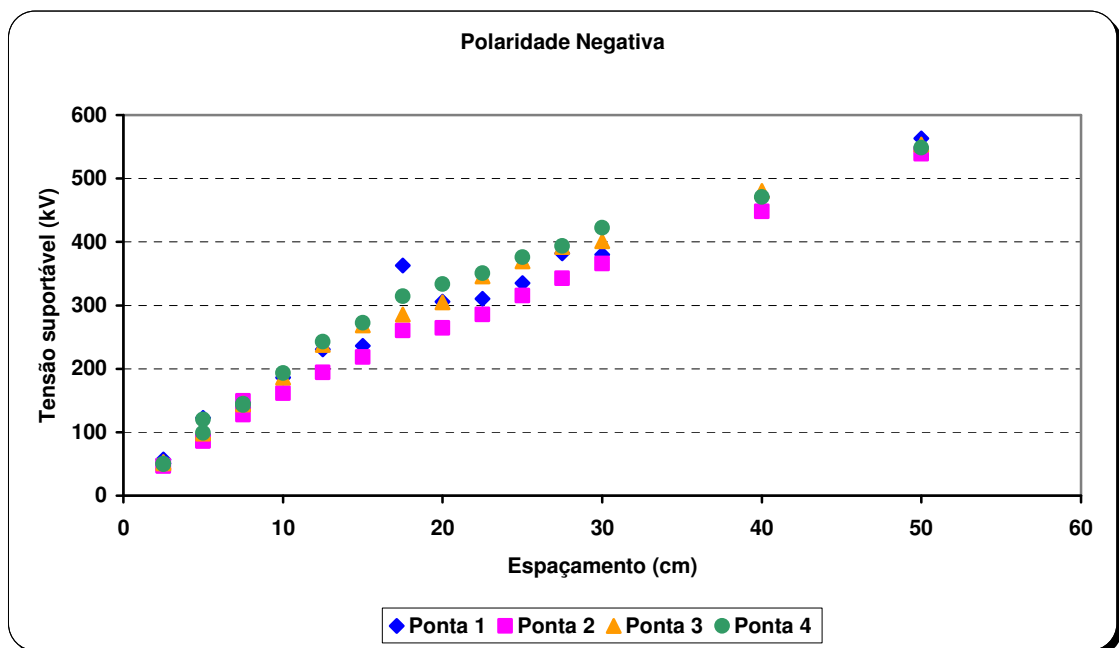


Figura 5.21 - Todas as configuração haste-plano, tensão de impulso atmosférico de polaridade negativa



Pode-se observar nas figuras acima que os resultados obtidos com as pontas 3 e 4 tiveram os menores valores de tensão de impulso atmosférico de polaridade positiva. Isto provavelmente ocorreu devido ao tipo de formação da descarga de polaridade positiva, pois a distribuição de campo mais não uniforme das pontas 3 e 4 favorece o processo de disrupção do espaçamento.

Já os resultados obtidos com a ponta 2 foram os de menor valor de tensão de impulso atmosférico de polaridade negativa. Essa característica da ponta 2 pode ser causada por ser uma ponta que provoca uma distribuição de campo no espaço mais uniforme, ao contrário das demais, que pela maior não uniformidade da distribuição de campo, o processo de formação de descarga na polaridade negativa é dificultado.

Considerando todos os resultados obtidos pelas 4 pontas ensaiadas, em um só gráfico, pode-se ter uma noção geral de uma configuração haste-plano, figura 5.22.

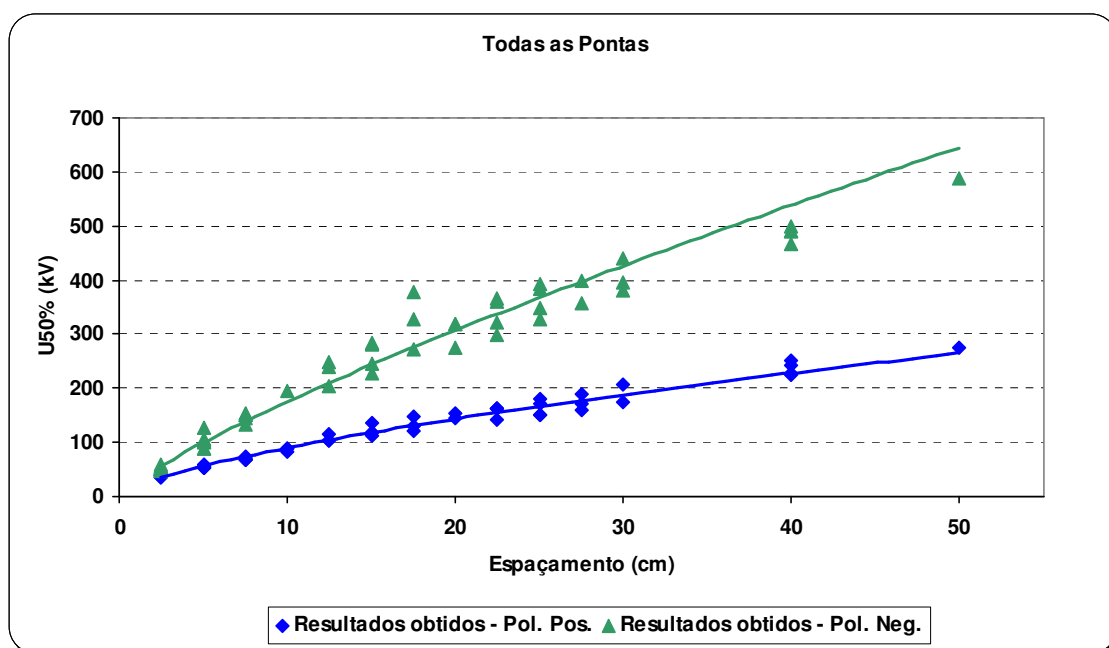


Figura 5.22 - Resultados obtidos ao ar livre com tensão de impulso atmosférico considerando todas as pontas

A figura 5.23 mostra um gráfico com valores de impulso atmosférico obtidos nos ensaios e retirados da bibliografia. Os valores fornecidos na IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing [23] são valores da configuração haste-haste e, segundo a norma, são valores informativos, pois ainda não são normalizados. Os valores retirados do trabalho de André Petit são referentes à configuração haste-plano. A norma IEC 600712 [19] fornece, em seu anexo G, uma equação que relaciona os espaçamentos com valores de  $U_{50\%}$  obtidos experimentalmente. A faixa de aplicabilidade da equação é para valores de espaçamento maiores que 1 metro. Segundo a norma os valores também são informativos. Pode-se observar na figura 5.23 que os valores da equação são conservativos para espaçamentos menores do que 1 metro.

Os resultados obtidos pelos ensaios indicam a possibilidade de uma melhor adequação das normas para a faixa de espaçamentos entre os eletrodos estudados. Além de acrescentar valores de  $U_{50\%}$  obtidos com diversos eletrodos ainda não apresentados.

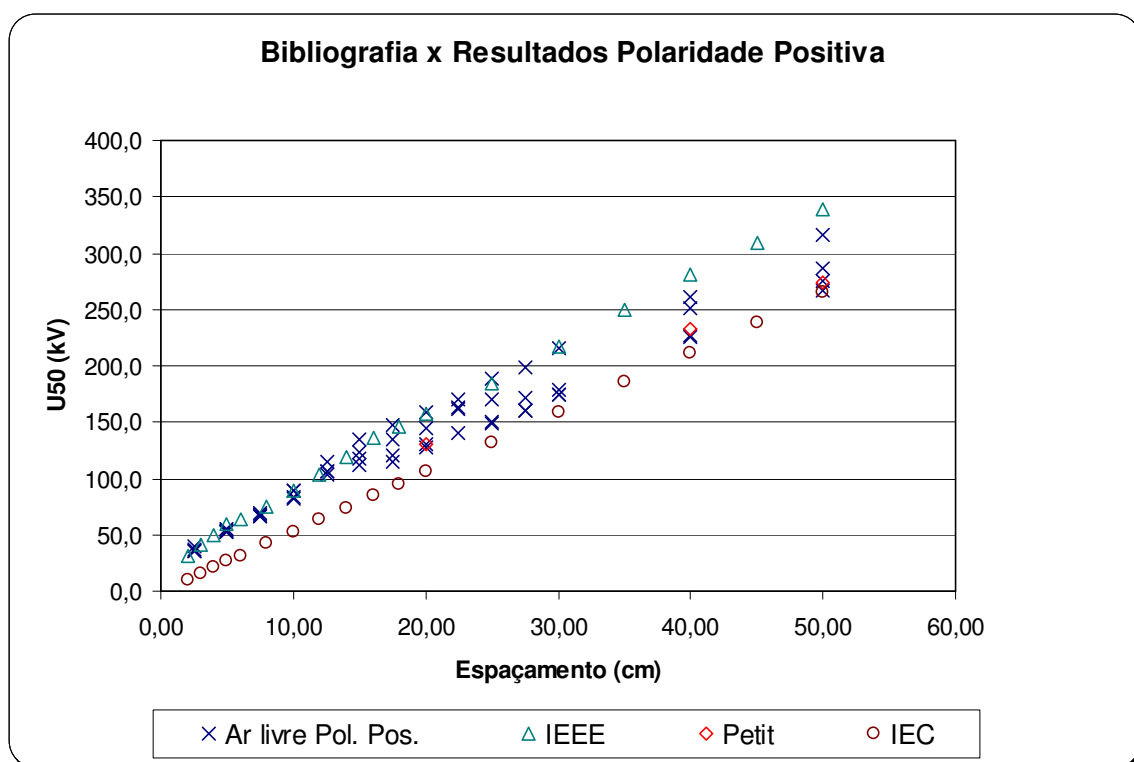


Figura 5.23 - Resultados obtidos nos ensaios e valores da bibliografia

### 5.4.1.2 – ENSAIOS EM AMBIENTE CONFINADO

Os próximos gráficos mostram os valores obtidos ao ar livre e dentro do cubículo, conforme arranjo da figura 5.7, permitindo fazer uma comparação entre eles.

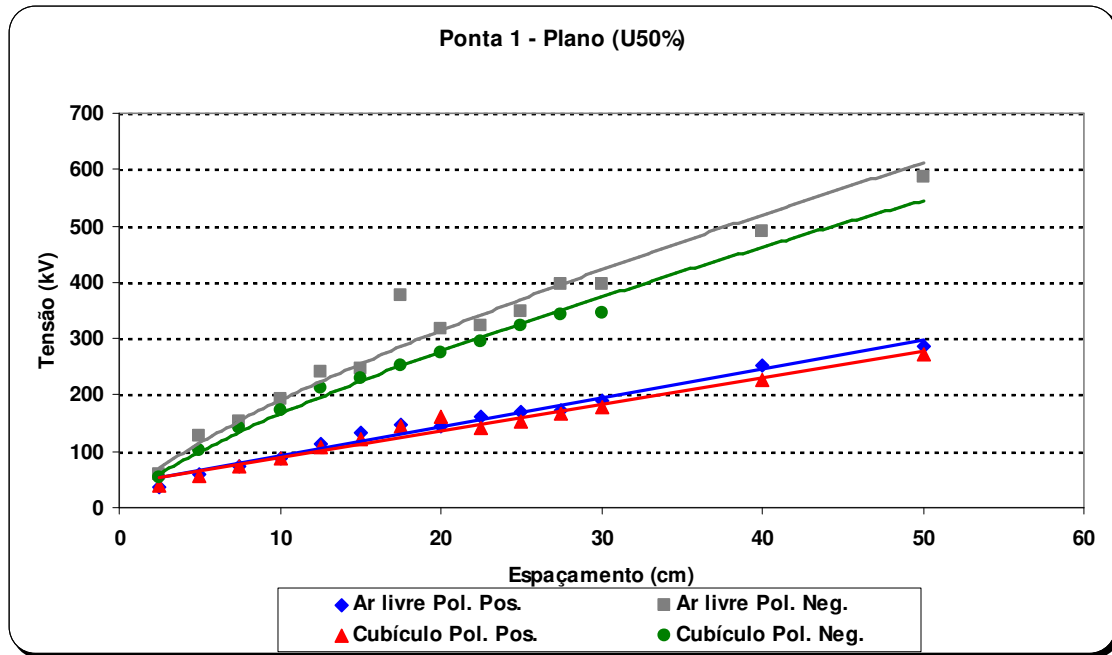


Figura 5.24 - Configuração haste-plano com a ponta 1, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

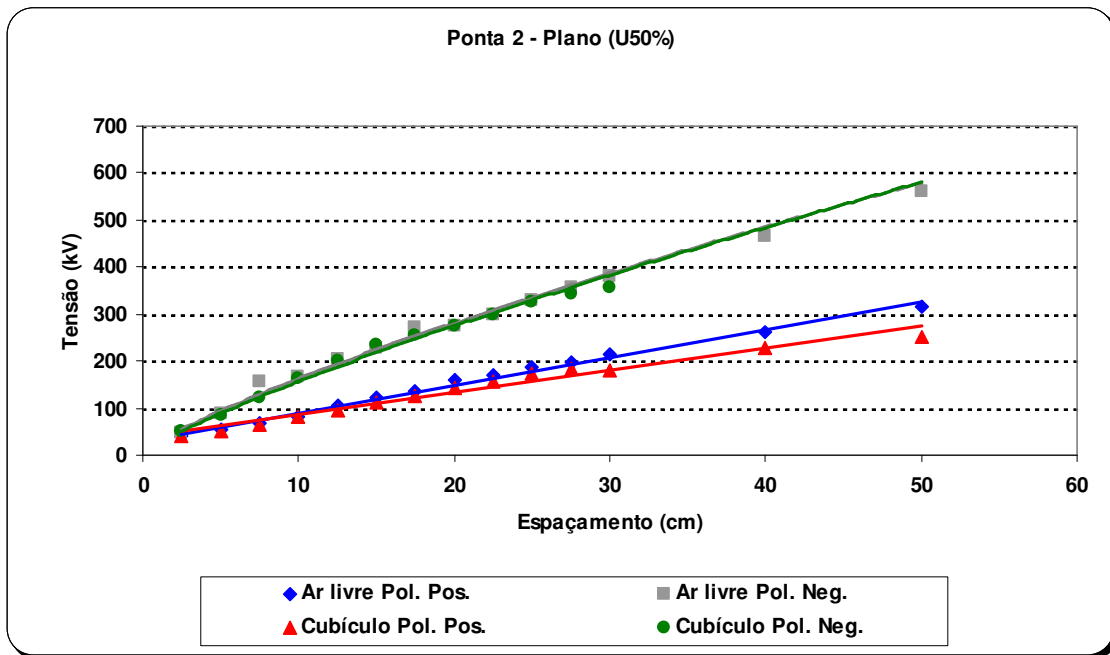


Figura 5.25 - Configuração haste-plano com a ponta 2, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

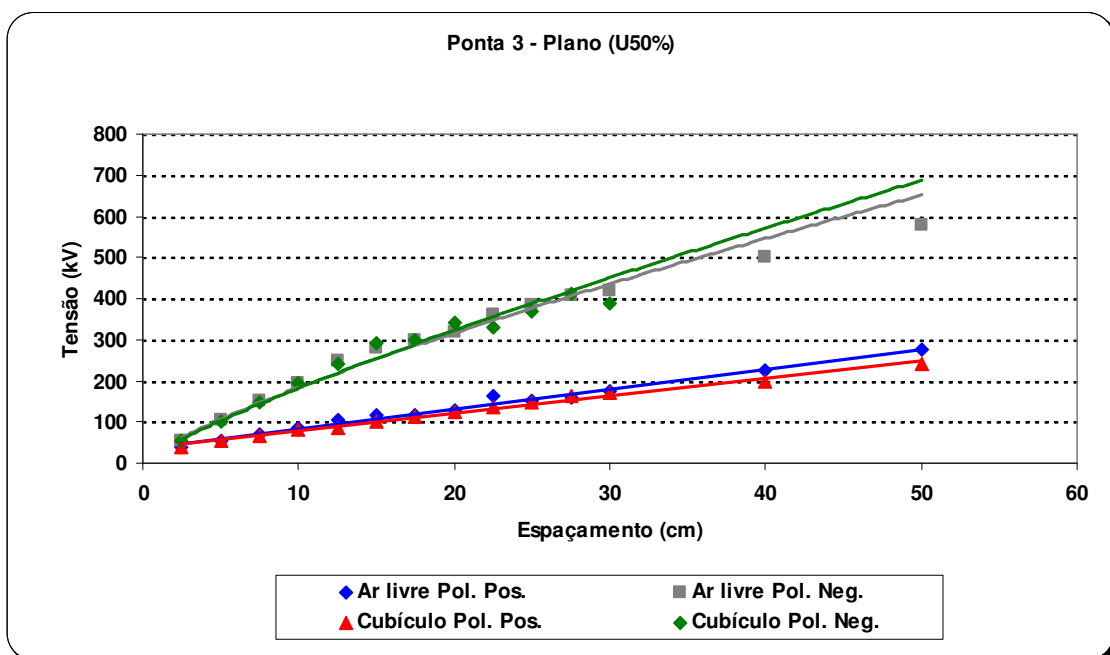


Figura 5.26 - Configuração haste-plano com a ponta 3, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

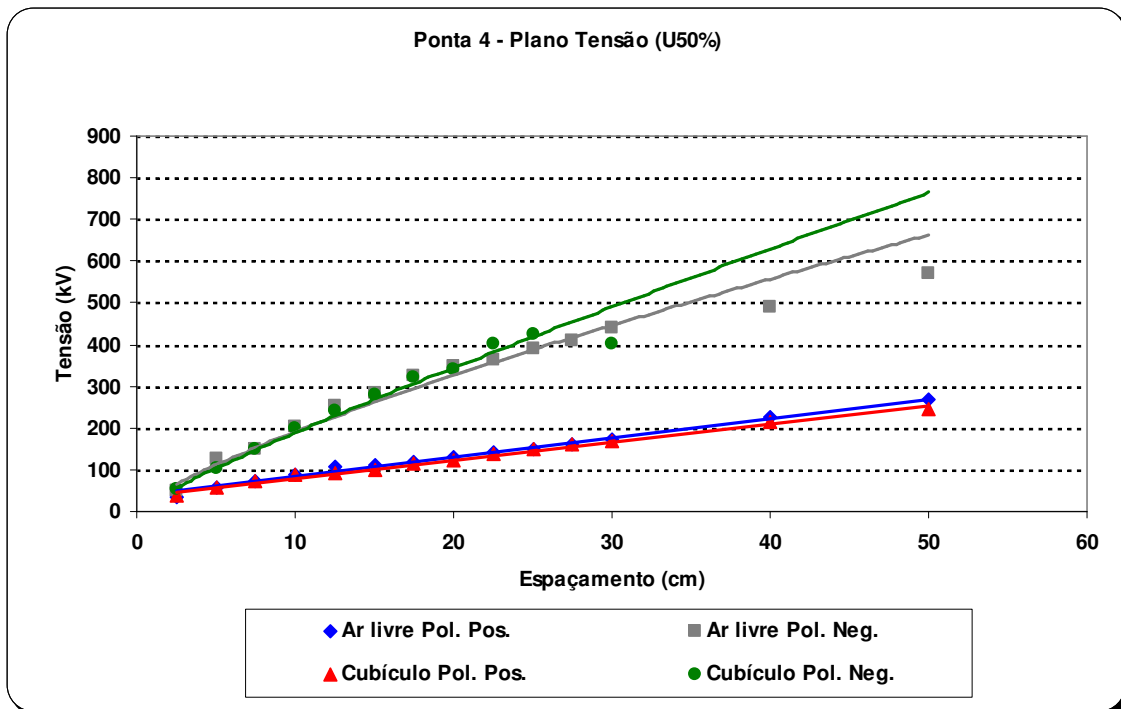


Figura 5.27 - Configuração haste-plano com a ponta 4, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

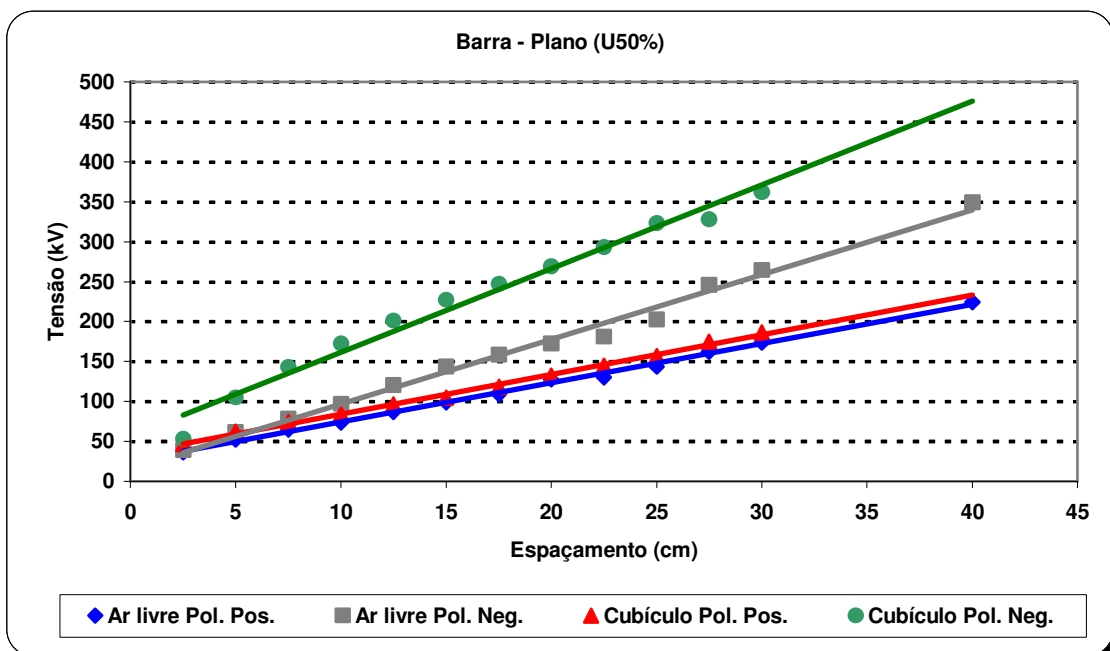


Figura 5.28 - Configuração barra-plano, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

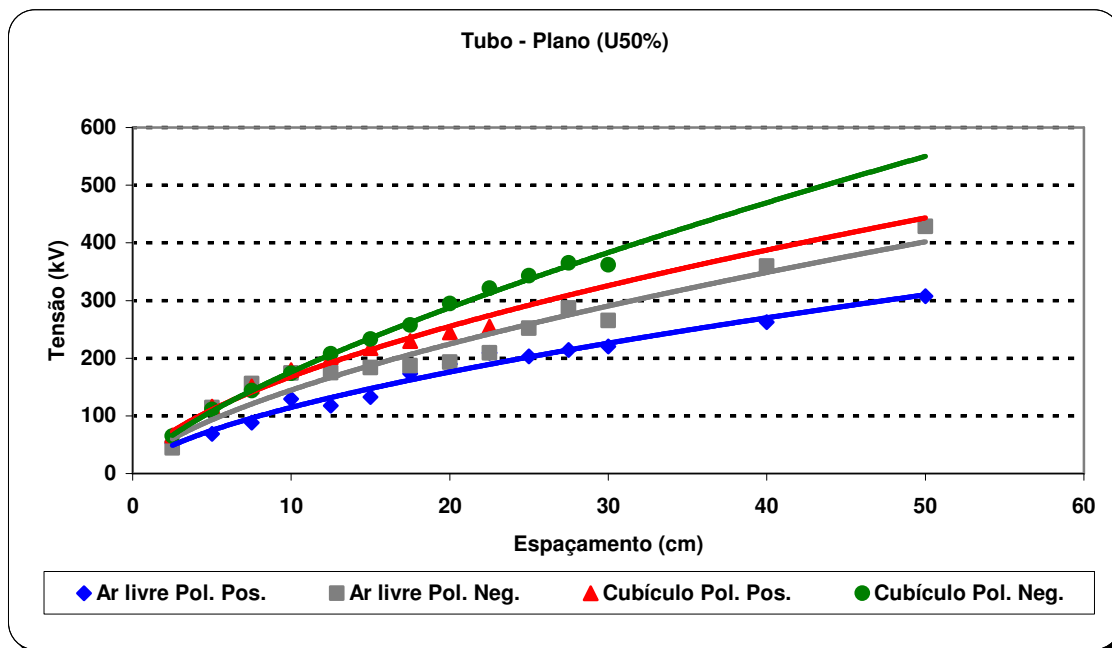


Figura 5.29 - Configuração tubo-plano, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

A tendência dos valores obtidos dentro do cubículo serem menores do que os obtidos ao ar livre conforme se aumenta o espaçamento é devido à maior influência das paredes metálicas na distribuição de campo dos espaçamentos. Mais à frente, esta influência será melhor analisada.

A configuração barra-plano submetida à tensão de impulso atmosférico de polaridade positiva teve resultados em ambiente confinado um pouco superiores aos resultados ao ar livre, diferentes do que se poderia esperar. Os resultados de polaridade negativa foram muito superiores aos resultados ao ar livre, figura 5.28. Esta diferença nos resultados pode ser causada pela influência na formação do volume de cargas na polaridade negativa, que se dá ao redor dos eletrodos. A distribuição de campo da barra, como pode ser vista no anexo A, se intensifica nas extremidades, então a presença das paredes metálicas modificou a distribuição de campo de forma que os valores de tensão foram maiores do que ao ar livre. A distribuição de campo se tornou mais não uniforme dentro do cubículo, isto pode ser visto pelo aumento da diferença entre os valores de polaridade positiva e negativa.

Os resultados obtidos com a configuração tubo-plano, figura 5.29, também mostram que os valores dentro do cubículo foram maiores do que ao ar livre, mas de uma forma

diferente, os valores de polaridade positiva e negativa em ambos estão mais próximos, isso porque a distribuição de campo é mais uniforme.

Não foi possível retirar completamente a influência das extremidades da barra e do tubo, principalmente quando ensaiados dentro do cubículo metálico. Essa influência somada à distribuição de campo peculiar destas configurações levou às diferenças encontradas nos resultados.

Depois dos ensaios realizados dentro do cubículo metálico grande, alguns ensaios com a configuração haste-plano foram repetidos dentro de um ambiente metálico menor, onde se podiam alterar as distâncias das paredes. Não foram feitos ensaios com a distância entre a parede e a haste menor do que a distância entre a ponta e o plano, pois para essas distâncias a descarga ocorria para as paredes. Esse arranjo está mostrado nas figuras 5.9 e 5.10.

Esses ensaios de IA com diferentes distâncias entre as paredes e a haste foram feitos com as pontas 2 e 3. Os ensaios foram realizados na polaridade positiva, que forneceu os menores valores de tensão disruptiva. Os resultados estão nas figuras 5.30 a 5.33.

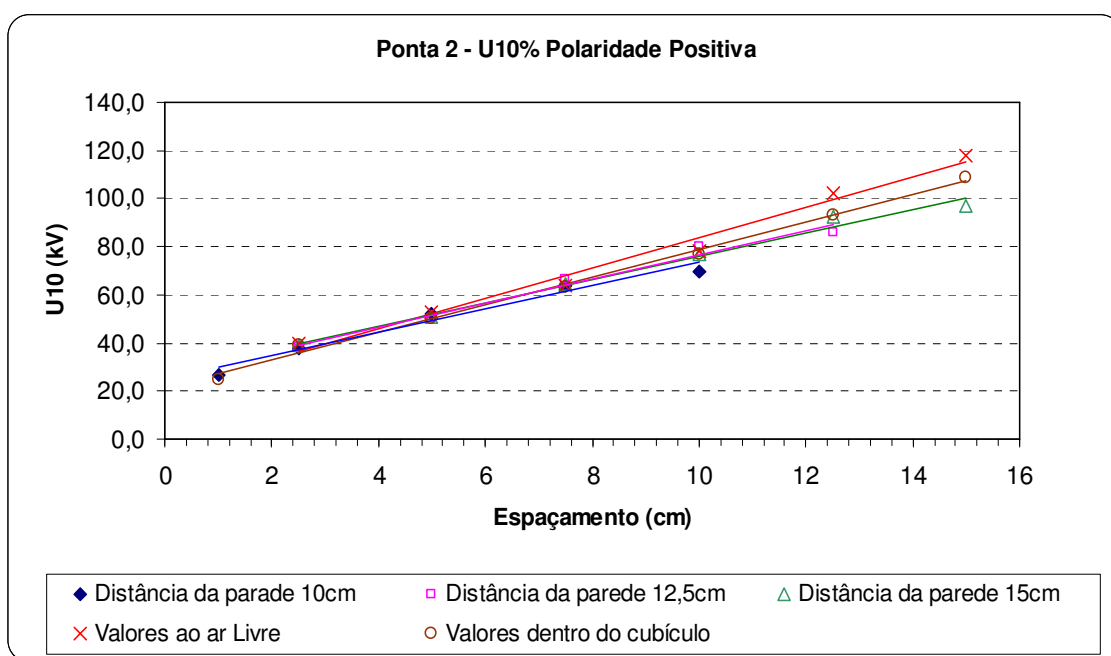


Figura 5.30 – Configuração haste-plano com a ponta 2 com diferentes distâncias das paredes metálicas, impulso atmosférico

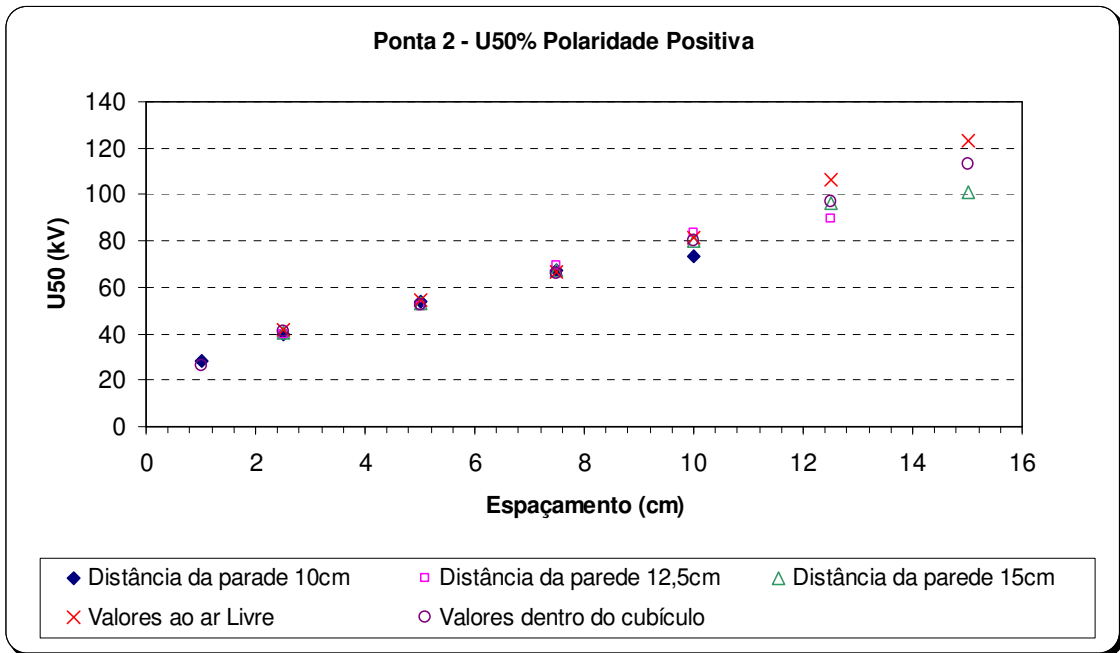


Figura 5.31 – Configuração haste-plano com a ponta 2 com diferentes distâncias das paredes metálicas, impulso atmosférico

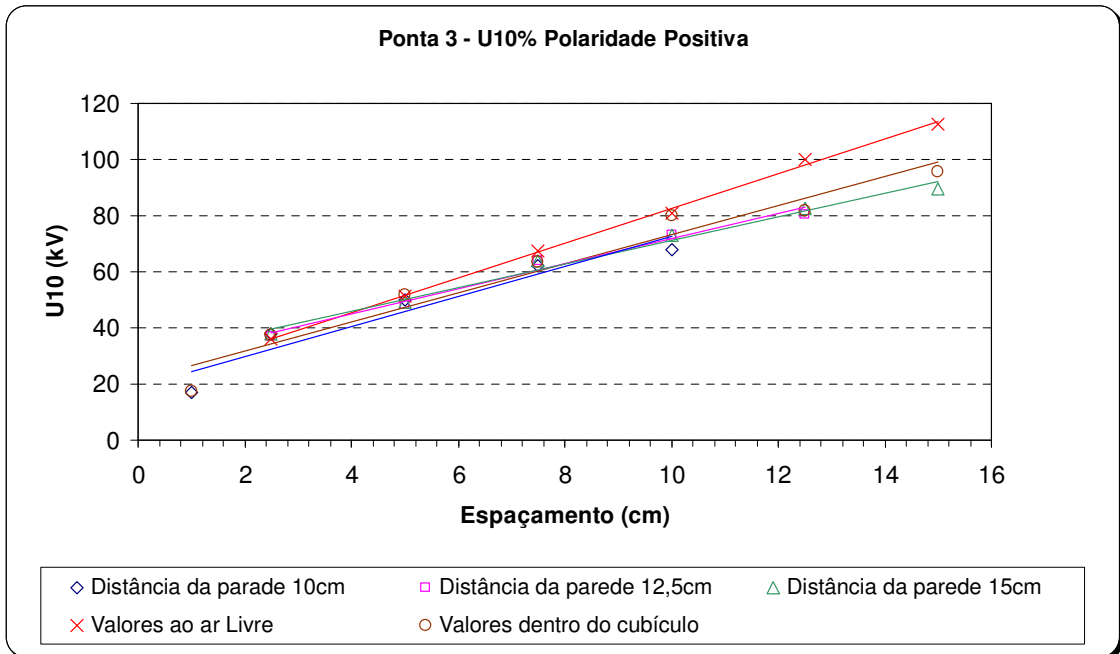


Figura 5.32 – Configuração haste-plano com a ponta 3 com diferentes distâncias das paredes metálicas, impulso atmosférico



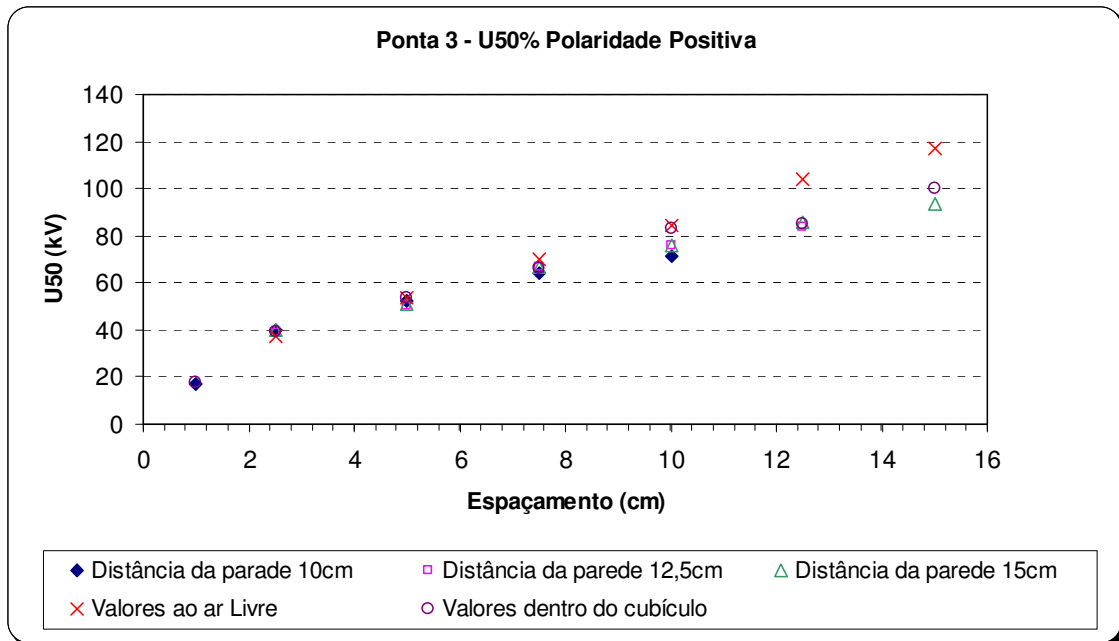


Figura 5.33 – Configuração haste-plano com a ponta 3 com diferentes distâncias das paredes metálicas, impulso atmosférico

Pode-se observar que quanto mais próxima, a parede está da haste, maior é a influência na tensão disruptiva. O valor da tensão disruptiva dos menores espaçamentos não é influenciada, mas nos maiores o valor da tensão é menor. Isto pode ser visto nos gráficos das figuras 5.34 e 5.35 onde são apresentados os valores percentuais da diferença entre os valores ao ar livre e dentro das quatro paredes metálicas. Nestes gráficos são apresentados os valores obtidos com o arranjo de paredes móveis, intitulado na legenda como “Distância das paredes” e os valores obtidos dentro da caixa metálica com cada uma das quatro paredes fixas a 75 cm da haste cuja legenda é “cubículo”.

A diferença percentual é calculada como a diferença entre o valor obtido ao ar livre e o valor obtido em ambiente confinado, dividido pelo valor ao ar livre e multiplicado por cem.

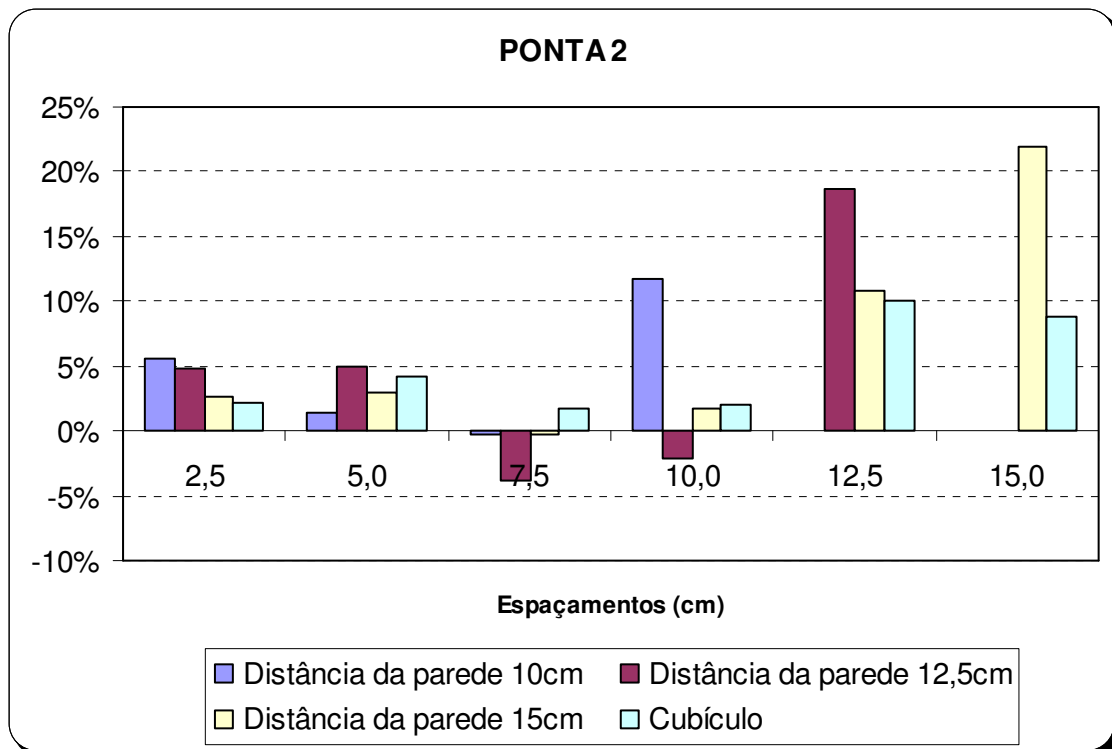


Figura 5.34 - Diferença percentual entre os valores da tensão disruptiva ao ar livre e em ambiente confinado, na presença das paredes metálicas e no cubículo

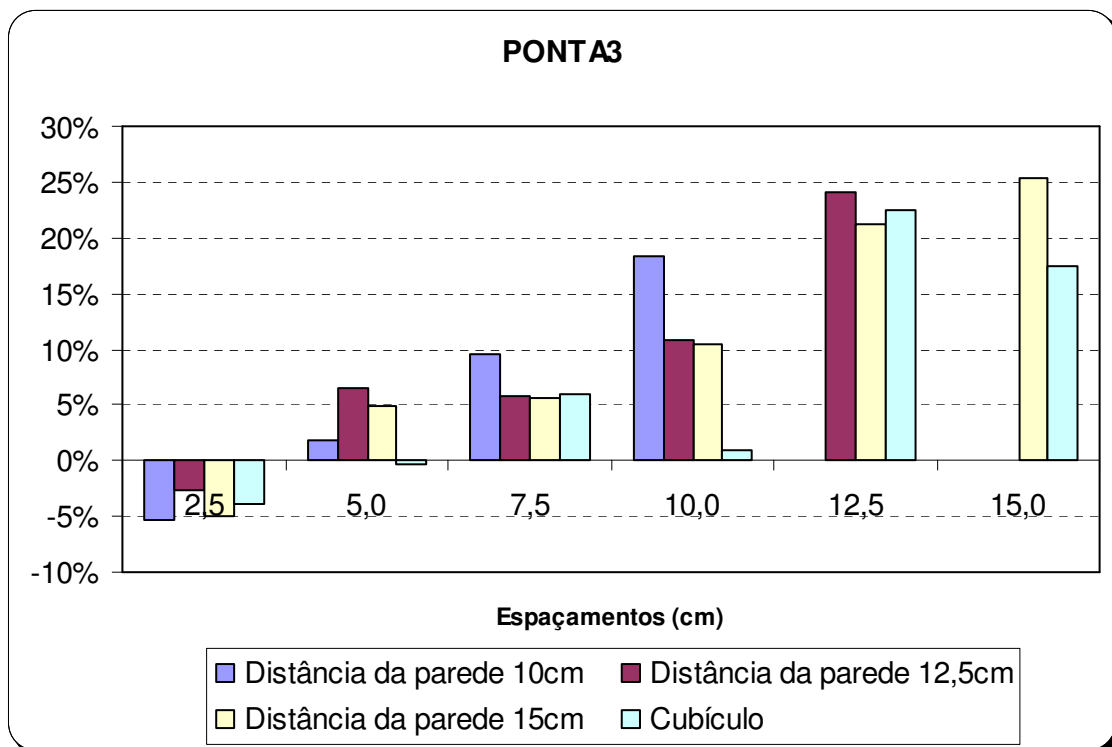


Figura 5.35 - Diferença percentual entre os valores da tensão disruptiva ao ar livre e em ambiente confinado, na presença das paredes metálicas e no cubículo

A influência não é apenas função da proximidade das paredes, mas da razão entre a distância da parede e a distância do espaçamento.

A diferença percentual dos resultados obtidos de tensão disruptiva ao ar livre e confinado está relacionada com a razão entre a distância das paredes e os espaçamentos entre os eletrodos, figura 5.36. Sendo **D** a distância entre a haste e a parede e **d** o espaçamento.

Na figura 5.36 estão os resultados dos ensaios das pontas 2 e 3 com as distâncias da parede 10, 12,5 e 15cm e espaçamentos variando de 2,5cm ao valor da distância da parede usada. O valor das diferenças percentuais entre a tensão disruptiva ao ar livre e em ambiente confinado foram plotados em função do valor de  $D/d$ . O eixo das abscissas está em escala logarítmica.

Pode-se observar que quanto menor a razão  $D/d$  maior é a diferença entre os valores ao ar livre e entre as paredes. Sendo a máxima diferença encontrada para a ponta 3 na razão  $D/d = 1$ , onde os valores da tensão disruptiva dentro das paredes metálicas são aproximadamente 25% menores do que ao ar livre.

A diferença entre os valores de tensão disruptiva dentro da faixa de 5% a -5% pode estar relacionado à incerteza de medição e aos processos estatísticos dos ensaios, então, podem ser considerados como não influenciados pela presença das paredes.

A mesma relação foi calculada para os resultados obtidos com a configuração ponta-plano dentro do cubículo, com todas as pontas e espaçamentos. O gráfico está na figura 5.37.

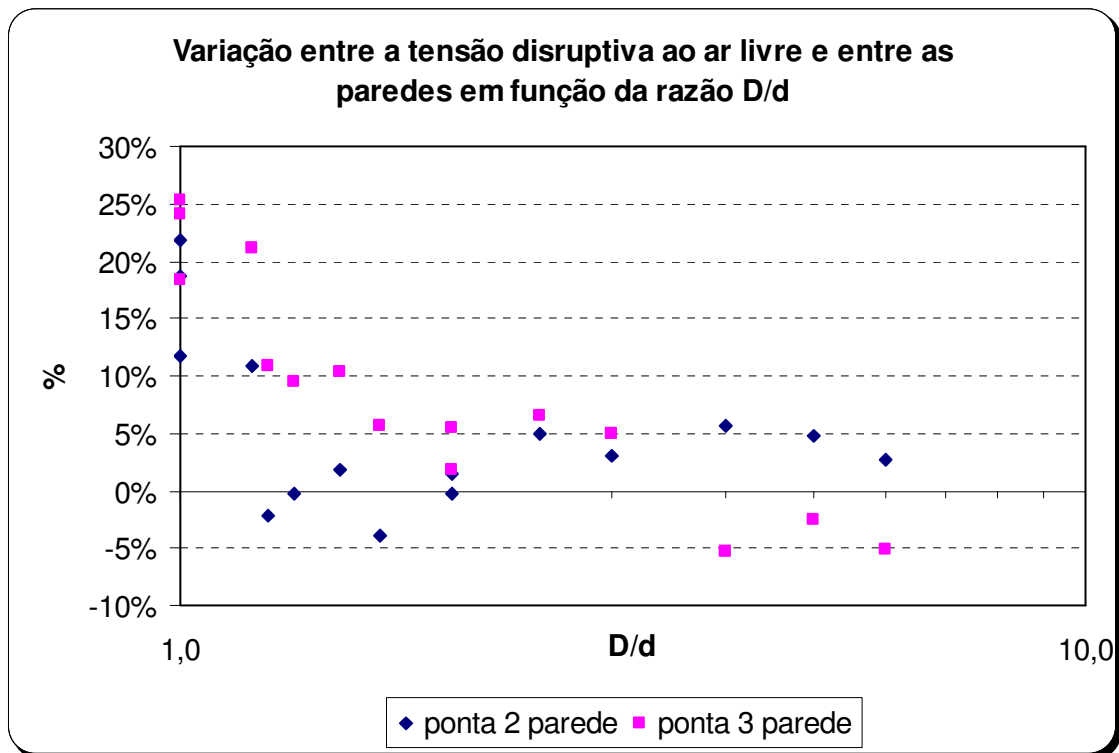


Figura 5.36 - Gráfico da diferença percentual da tensão disruptiva de IA polaridade positiva, entre os valores ao ar livre e confinado, em função da razão D/d

Os valores da ponta 2 observados no gráfico da figura 5.57 mostram mais pronunciadamente a influência da proximidade da parede metálica nos valores da tensão disruptiva. Quanto menor o valor da razão D/d maior é a influência das paredes, ou seja, o valor da tensão disruptiva é menor em ambiente confinado quando existe a influência das paredes metálicas sobre o espaçamento.

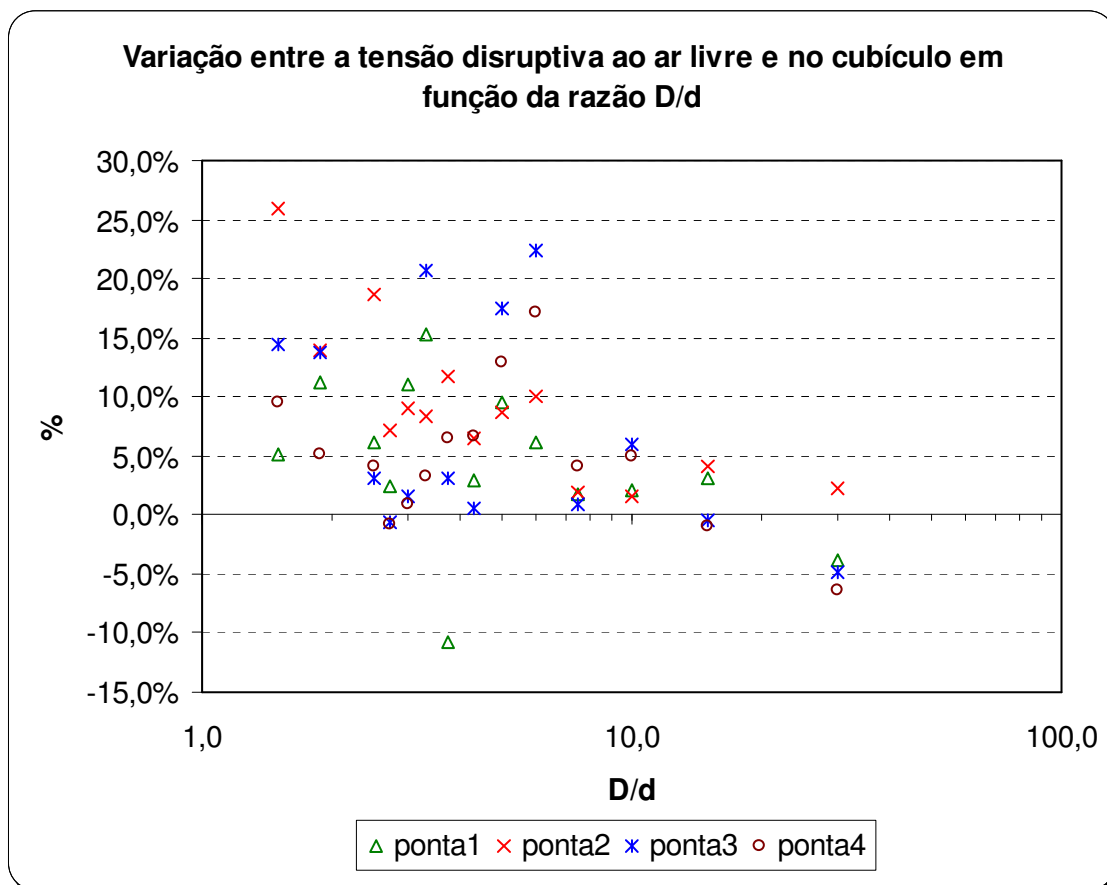


Figura 5.37 - Gráfico da diferença percentual da tensão disruptiva de IA polaridade positiva, entre os valores ao ar livre e confinado, em função da razão D/d

#### 5.4.1.3 – RESULTADOS COM OS ISOLADORES

Os resultados dos ensaios com os isoladores, submetidos a IA, estão apresentados nas tabelas 5.1 a 5.8. A descrição da montagem refere-se aonde o isolador foi fixado, na base ou no cavalete. A base foi utilizada para simular a montagem dentro de um cubículo, figura 5.38-a. O cavalete metálico foi o mesmo usado nos ensaios normalizados de isoladores, com 1 metro de altura do solo deve estar afastado de qualquer objeto pelo menos 1 metro, figura 5.38-b. Por norma o eletrodo deve ser um tubo fixado perpendicularmente ao cavalete. As colunas das tabelas intituladas condutor referem-se ao tipo de eletrodo que foi conectado ao isolador, barra ou tubo. A montagem interna foi feita dentro da caixa metálica com uma parede por dentro diminuindo as dimensões internas para 1,5m x 1,0 m. Os eletrodos de conexão ficam paralelos a esta parede.



a)



b)

Figura 5.38 – a) isolador montado na base, b) isolador montado no cavalete

Tabela 5.1 – Resultados de IA na polaridade positiva com isolador 1

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	119,0
Base	Cubículo	barra	115,0
Base	Ar livre	tubo	129,2
Base	Cubículo	tubo	132,0
Cavalete	Ar livre	Normalizada	124,1

Tabela 5.2 – Resultados de IA na polaridade negativa com isolador 1

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	146,0
Base	Cubículo	barra	144,0
Base	Ar livre	tubo	150,0
Base	Cubículo	tubo	147,0
Cavalete	Ar livre	Normalizada	144,0

Tabela 5.3 – Resultados de IA na polaridade positiva com isolador 2

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	127,0
Base	Cubículo	barra	138,0
Base	Ar livre	tubo	188,0
Base	Cubículo	tubo	161,7
Cavalete	Ar livre	Normalizada	173,9

Tabela 5.4 – Resultados de IA na polaridade negativa com isolador 2

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	199,0
Base	Cubículo	barra	210,0
Base	Ar livre	tubo	198,8
Base	Cubículo	tubo	215,4
Cavalete	Ar livre	Normalizada	195,9

Tabela 5.5 – Resultados de IA na polaridade positiva com isolador 3

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	144,4
Base	Cubículo	barra	137,9
Base	Ar livre	tubo	175,5
Base	Cubículo	tubo	182,1
Cavalete	Ar livre	Normalizada	161,4

Tabela 5.6 – Resultados de IA na polaridade negativa com isolador 3

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	192,4
Base	Cubículo	barra	223,6
Base	Ar livre	tubo	195,2
Base	Cubículo	tubo	235,2
Cavalete	Ar livre	Normalizada	256,2

Tabela 5.7 – Resultados de IA na polaridade positiva com isolador 4

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	155,7
Base	Cubículo	barra	159,8
Base	Ar livre	tubo	219,5
Base	Cubículo	tubo	202,3

Tabela 5.8 – Resultados de IA na polaridade negativa com isolador 4

Montagem		Condutor	U50% (kV)
Base	Ar livre	barra	206,2
Base	Cubículo	barra	263,8
Base	Ar livre	tubo	248,5
Base	Cubículo	tubo	277,7

Ao se comparar os valores obtidos com os diferentes condutores, observa-se que a tensão disruptiva da configuração isolador com tubo é maior do que com a configuração isolador com barra, normalmente utilizada, confirmando que com a utilização do tubo, que uniformiza mais a distribuição de campo ao seu redor, aumentaria a suportabilidade dielétrica do projeto de isolação.

A configuração isolador com barra possui tensão disruptiva de polaridade positiva menor do que a tensão disruptiva obtida com o ensaio normalizado do mesmo isolador. Isto mostra a necessidade de se adaptar os métodos de ensaio para os isoladores que serão utilizados no interior de cubículos pois, além da proximidade das paredes aterradas, o tipo de condutor e a base são diferentes das utilizadas nos ensaios normalizados. Esse conceito pode ser estendido aos demais equipamentos que são instalados dentro de cubículos e são ensaiados ao ar livre com uma montagem diferente da utilizada na prática.

Os valores mostrados acima mostram a dificuldade em se projetar um cubículo com valores de equipamentos obtidos pelos atuais métodos de ensaio normalizados.



Os valores de tensão disruptiva dos isoladores ensaiados dentro do cubículo não mostraram influência apreciável do ambiente confinado, pois a distância entre as paredes e os isoladores foi superior à altura dos isoladores. Contudo as normas técnicas [9 e 11] já definem que os ensaios devem ser realizados a um metro de distância de qualquer objeto aterrado, então deve-se estudar em futuros trabalhos um arranjo de ensaio que possibilite quantificar a influência da proximidade das paredes aterradas na suportabilidade dielétrica dos isoladores.

Uma hipótese para explicar os resultados obtidos com a configuração da barra é que como a intensidade de campo é maior nas extremidades da barra, anexo A, diferente do que ocorre com outros eletrodos, a presença da parede uniformiza a distribuição de campo por isso dentro do cubículo a tensão disruptiva foi maior do que ao ar livre.

#### **5.4.2 - ENSAIOS DE TENSÃO ALTERNADA**

Neste item são apresentados os resultados obtidos com os ensaios com tensão alternada ao ar livre e em ambiente confinado.

##### **5.4.2.1 - ENSAIOS AO AR LIVRE**

Os resultados ao ar livre de tensão alternada das configurações haste-plano e condutor-plano estão no anexo F figuras F.1 a F.6.

Os ajustes nos gráficos de tensão alternada foram basicamente lineares, novamente sem a intenção de gerar tendência para extrapolar os resultados, apenas ajudando na visualização.

Os resultados obtidos ao ar livre com as configurações ponta-plano variam linearmente com a posição, na faixa de espaçamentos ensaiados.

O gráfico da figura 5.39 foi traçado com todos os resultados obtidos nos ensaios de tensão alternada ao ar livre.

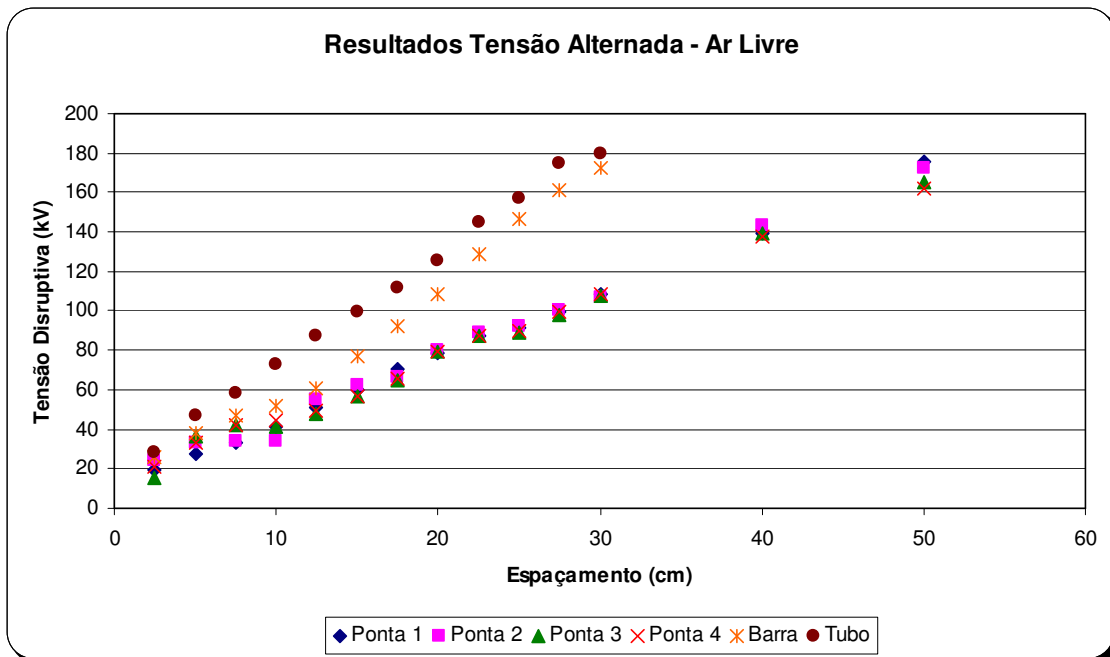


Figura 5.39 – Resultados ao ar livre com tensão alternada

O gráfico da figura 5.40 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tensão alternada e os valores da bibliografia.

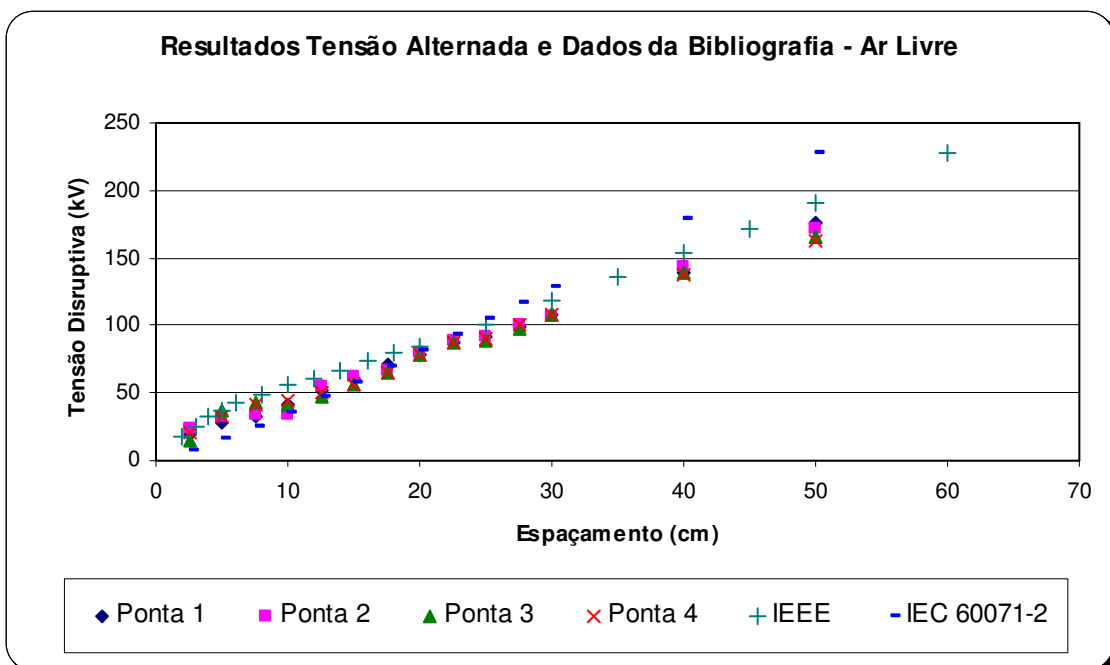


Figura 5.40 - Resultados ao ar livre e valores da bibliografia

Os valores da norma IEEE [23] são valores obtidos experimentalmente com a configuração haste-haste e são valores informativos, ou seja, ainda não estão normalizados. Os valores da norma IEC [19] foram obtidos pela equação nela descrita. Segundo a norma a equação fornece dos valores de tensão aproximados para a configuração haste-plano com espaçamentos entre os eletrodos menores do que 3 metros.

Como se pode observar os valores da IEEE são maiores que os valores obtidos nos ensaios. Os valores da IEC, para os espaçamentos até 10cm, são menores, sendo conservativo, e para os valores superiores a 10cm, são maiores que os obtidos nos ensaios.

#### 5.4.2.2 - ENSAIOS EM AMBIENTE CONFINADO

As figuras 5.41 a 5.44 mostram os resultados dos ensaios ao ar livre e dentro do cubículo com as paredes fixas.

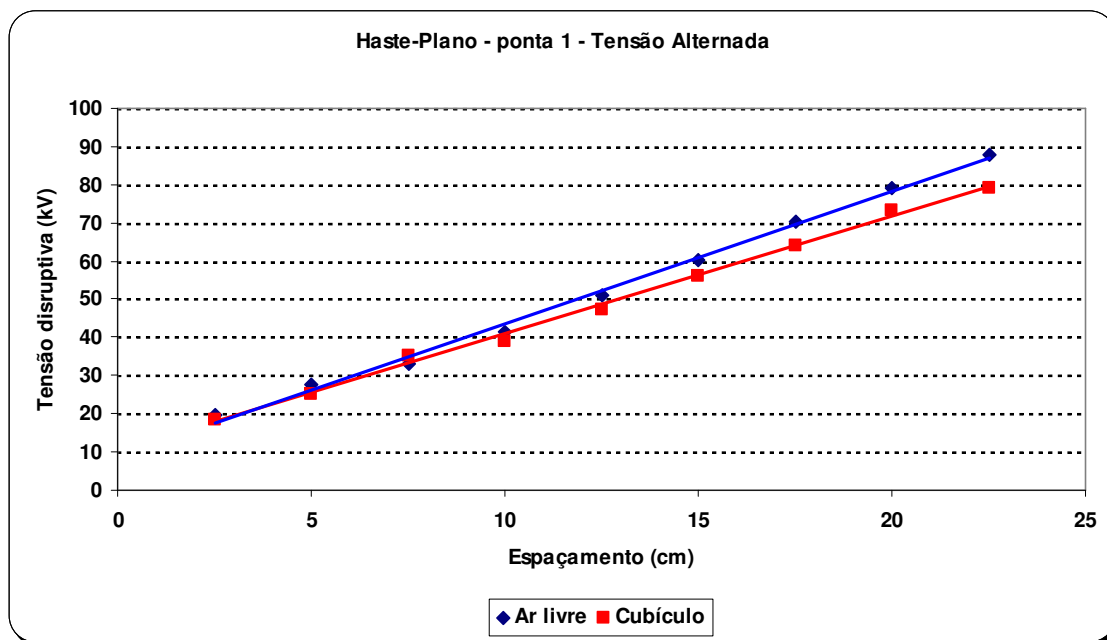


Figura 5.41 - Configuração haste-plano com a ponta 1, valores com tensão alternada ao ar livre e dentro do cubículo

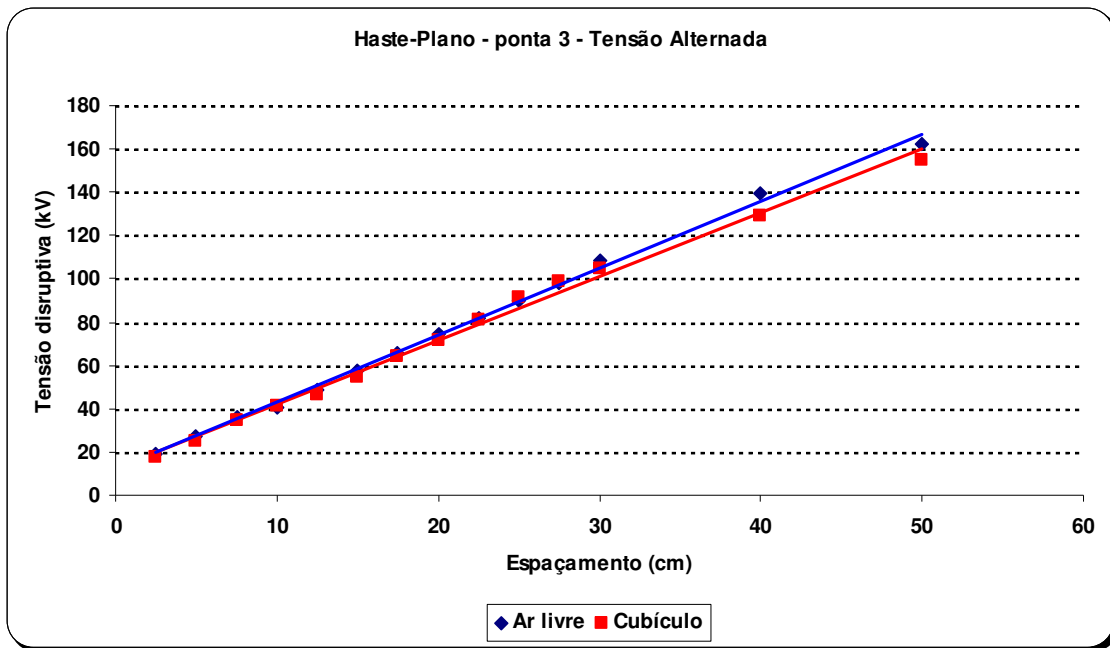


Figura 5.42 - Configuração haste-plano com a ponta 3, valores com tensão alternada ao ar livre e dentro do cubículo

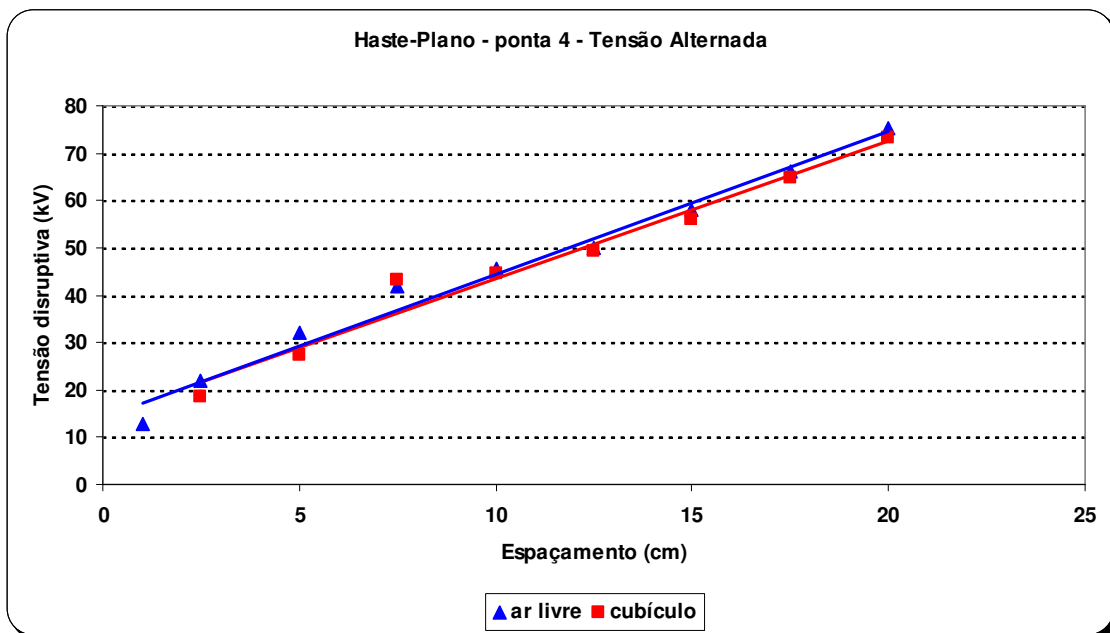


Figura 5.43 - Configuração haste-plano com a ponta 4, valores com tensão alternada ao ar livre e dentro do cubículo

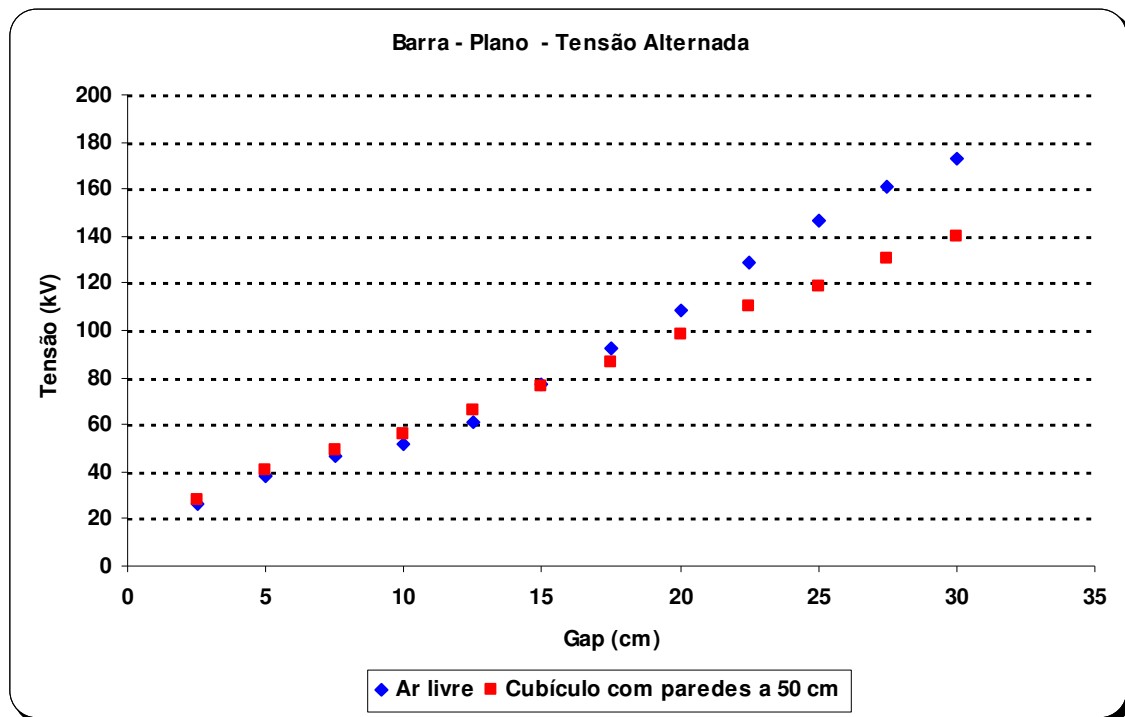


Figura 5.44 - Configuração barra-plano, valores com tensão alternada ao ar livre e dentro do cubículo

Foi possível observar uma diferença mais significativa entre os valores obtidos ao ar livre e dentro do cubículo com a ponta 1, que não produz uma distribuição de campo tão não uniforme quanto as pontas 3 e 4.

Os resultados da configuração barra-plano, figura 5.44, mostram que os valores dentro do cubículo foram menores do que ao ar livre, principalmente para as maiores distâncias. O cubículo teve suas dimensões diminuídas em uma direção para 50 cm possibilitando observar uma maior influência no valor de tensão disruptiva para os menores espaçamentos entre os eletrodos.

### 5.4.2.3 - ENSAIOS COM ISOLADORES

Os resultados dos ensaios ao ar livre de todos os isoladores e em ambiente confinado dos isoladores 1 e 2, submetidos à tensão alternada, estão na tabela 5.9.

Na tabela, a coluna montagem refere-se à forma como os isoladores foram montados para os ensaios, que poderia ser em cima do cavalete ou fixado à base. A base pode ser vista na figura 5.38-a e o cavalete tem 1m de altura feito de metal, figura 5.38-b, os

mesmo usados nos ensaios de impulso atmosférico. O objetivo foi o mesmo dos ensaios com tensão de impulso atmosférico.

Tabela 5.9 - Resultados dos ensaios de tensão alternada nos isoladores

Montagem		condutor	condição	Tensão disruptiva (kV)			
				isolador 1	isolador 2	isolador 3	isolador 4
-	cavalete	tubo	ar livre	90,5	97,5	147,7	190,7
-	base	tubo	ar livre	93,2	100,6	124,9	170,2
-	cavalete	barra	ar livre	83,0	96,2	104,0	146,5
-	base	barra	ar livre	84,9	90,9	99,7	116,8
parede 21cm	base	barra	confinado	82,1	-	-	-
parede 30cm	base	barra	confinado	84,6	-	-	-
parede 50cm	base	barra	confinado	86,4	-	-	-
parede 21cm	base	barra	confinado	-	90,0	-	-
parede 30cm	base	barra	confinado	-	93,2	-	-
parede 53,5cm	base	barra	confinado	-	93,0	-	-

Os isoladores foram ensaiados com um arranjo de paredes móveis. O objetivo foi observar a influência causada pelas paredes aterradas na suportabilidade dielétrica do isolador. O ensaio consistiu em distanciar as paredes do isolador, desde a posição em que havia a iminência de ocorrer descarga para a parede, a menor distância, até a posição onde a influência na tensão disruptiva não fosse mais notada. Os resultados dos ensaios dos isoladores 1 e 2 estão na tabela 5.9.

Foi observado que a configuração do isolador montado com a barra tem valor de tensão disruptiva menor do que a configuração montada com o tubo. Este resultado foi importante, pois confirmou a suspeita de que existia diferença dos valores de tensão obtidos com os isoladores montados com tubo, método normalizado, e barra, montagem no cubículo. Os valores de tensão disruptiva obtidos nos ensaios em ambiente confinado foram menores do que os valores obtidos nos ensaios ao ar livre.

## 6 - CONCLUSÃO

As dificuldades na aprovação dos ensaios dielétricos de cubículos, freqüentemente observadas nos laboratórios, levaram a supor que o problema seria no projeto do isolamento interno dos equipamentos. A razão seria as alterações nos valores de suportabilidade das configurações internas causadas pelo ambiente interno do cubículo. Os ensaios utilizando um protótipo de cubículo mostraram esta influência para espaçamentos variando entre 2,5 cm e 50 cm.

A primeira parte deste trabalho consistiu no estudo das diversas configurações de eletrodos ao ar livre. Foram obtidos valores de tensão disruptiva de IA e tensão alternada da configuração haste-plano e condutor-plano com espaçamentos variando de 2,5 cm a 50 cm, pequenos espaçamentos. Além das normas técnicas não se focarem nas pequenas distâncias entre os eletrodos, nem todas as configurações de eletrodos ensaiadas neste trabalho estão nas normas. Então os resultados obtidos neste trabalho complementam os valores já encontrados na bibliografia, artigos e normas. Comparando os resultados obtidos com os já existentes na bibliografia, foi possível observar que a configuração haste-plano se confirmou ser a configuração que resulta nos menores valores de tensão disruptiva.

O estudo das configurações haste-plano e condutor-plano em ambiente confinado, segunda parte do trabalho, foi iniciado com os ensaios realizados no protótipo de cubículo. Esperava-se que nele pudessem ser feitos os ensaios das diversas configurações de eletrodos e fosse observada a influência das paredes. Ocorreu que para os pequenos espaçamentos a influência notada foi menor do que a esperada e no caso dos isoladores as extremidades dos condutores ficaram muito próximas de duas paredes dificultando realizar muitos ensaios.

Por isso foram realizados os ensaios, com os menores espaçamentos, que são os valores encontrados no interior de cubículos, no arranjo com as paredes móveis. Com este arranjo pode-se avaliar melhor a influência das paredes.

A partir dos resultados destas experiências com tensão de impulso atmosférico observou-se que a influência das paredes aterradas no valor da tensão disruptiva dos espaçamentos não era apenas função da distância de que ela se encontrava da haste, mas deve-se considerar também o espaçamento. Foi possível mostrar valores de

tensão disruptiva de impulso atmosférico de polaridade positiva em ambiente confinado até 15% menores do que ao ar livre, confirmando a importância da teoria de que o ambiente confinado com as paredes aterradas causaria influências.

No caso de tensão alternada as configurações foram ensaiadas em um protótipo de cubículo e foi observada a influência das paredes aterradas nos valores de tensão disruptiva desde os menores espaçamentos. Era também esperada uma menor diferença nos valores de tensão devido à natureza do tipo de tensão. Isto foi confirmado pelos resultados das experiências. Os ensaios de tensão alternada serviram para confirmar os resultados obtidos com tensão de impulso atmosférico.

Os ensaios de estudo da influência da proximidade das paredes na tensão disruptiva dos isoladores foram feitos fora do protótipo de cubículo, para eliminar o efeito das pontas dos condutores a eles conectados, com as paredes do cubículo. O arranjo, então, foi montado com duas chapas de alumínio, de comprimento maior do que o comprimento dos condutores, colocadas na vertical, ao lado dos arranjos dos isoladores. A diferença encontrada, nos ensaios de tensão de impulso atmosférico, entre os valores ao ar livre e na presença das paredes não foi conclusiva, pois não houve um padrão para os resultados obtidos.

Um fato importante observado nos ensaios com os isoladores foi que, além dos resultados obtidos pelo método normalizado serem maiores do que os resultados obtidos pelas demais configurações tanto utilizando tubo e barra, também foi observado que com o tubo a suportabilidade dielétrica aumenta em relação à montagem com a barra, que é utilizada nas montagens de cubículos. A substituição de condutores do tipo barra pelos do tipo tubo dentro de cubículos requer outros estudos mais aprofundados e não apenas o estudo dielétrico, por exemplo, ensaios de potência de curto circuito, para se analisar outras variáveis de projeto como a condução de corrente de curto circuito, resistência mecânica, espaço interno e conexões.

A presença do isolador no espaçamento não altera o valor de sua suportabilidade dielétrica para as tensões de impulso atmosférico de polaridade positiva e tensão alternada. No caso da polaridade negativa a presença do isolador diminui a suportabilidade do espaçamento, pois o processo de formação da descarga da polaridade negativa, como foi visto na parte teórica, se dá pela superfície do isolador.



Os resultados obtidos com as configurações tubo-plano e barra-plano não foram tão esclarecedores, pois estas configurações têm distribuição de campo elétrico mais complexa do que as configurações haste-plano, ocorrendo que existem muitos fatores adicionais que influenciam o processo de formação de descarga no espaçamento. O processo de formação de descarga no caso da configuração haste-plano é mais simples e mais didático, como visto na parte teórica.

Os ensaios com tensão alternada nas diversas configurações foram mais difíceis de serem realizados em laboratório, pois existem muitos fatores externos que influenciam na suportabilidade dielétrica da isolação, tais como potência da fonte, condições atmosféricas, impurezas no ar, tempo de subida da tensão e tipo de eletrodo. Os resultados obtidos com as configurações ensaiadas com tensão alternada confirmam as avaliações realizadas com impulso atmosférico.

A teoria ajuda a explicar alguns fenômenos observados durante os ensaios e ajudam a explicar os valores de tensão disruptivas encontrados. O modelo “Streamer” é um bom modelo para esses tipos de ensaio, com certas considerações, como não se considerar a influência da presença de cargas espaciais e sua dinâmica no espaçamento.

Os valores que se encontram nas normas, apesar de não serem compatíveis com estes espaçamentos entre eletrodos estudados, têm valores conservativos. Utilizando os resultados obtidos nos ensaios deste trabalho o projeto de isolamento de um cubículo pode ser mais otimizado e seguro.

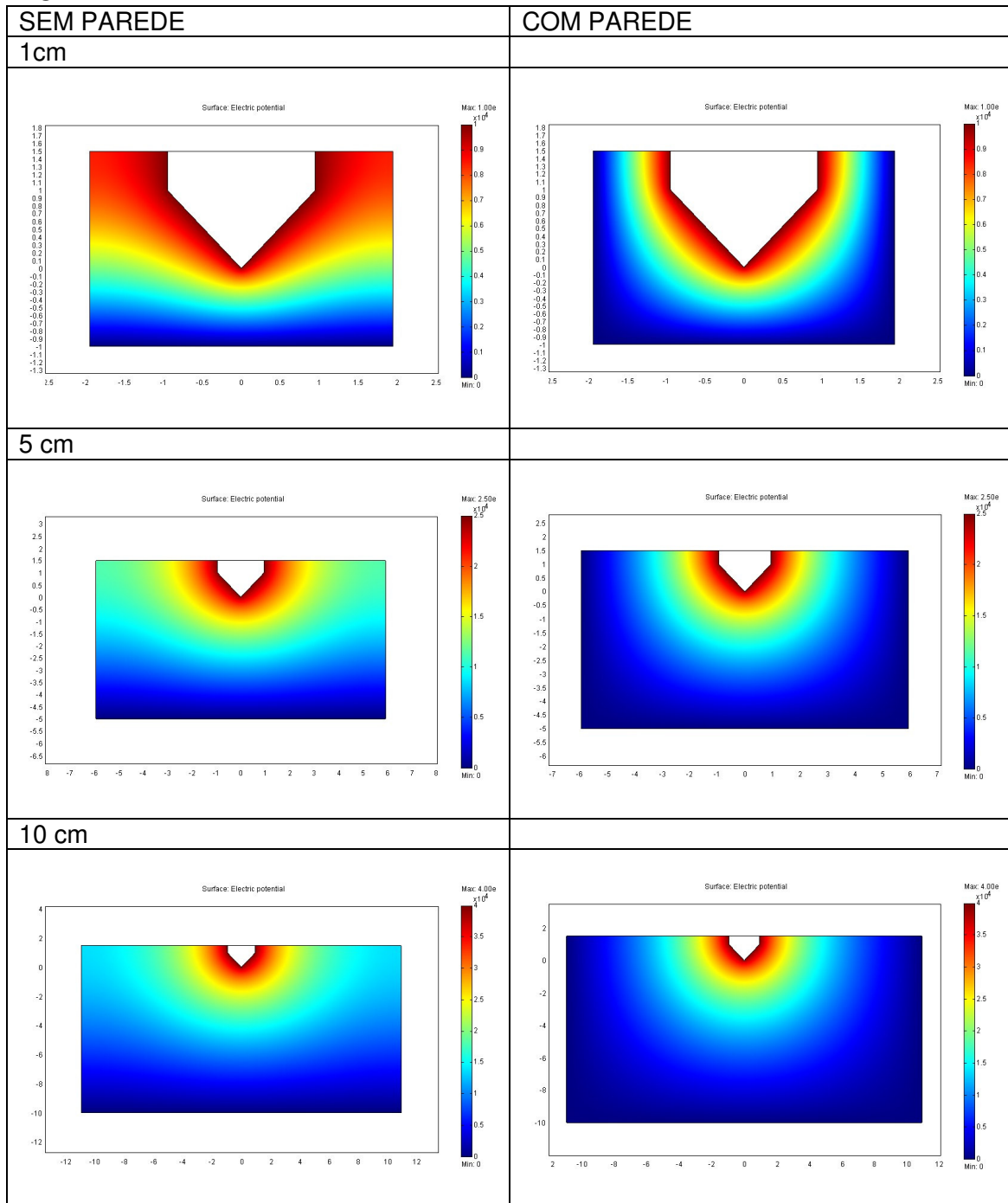
Próximos trabalhos podem ser feitos, como o estudo de espaçamentos maiores. Talvez não ensaiando todas as configurações aqui ensaiadas, somente as que poderiam gerar resultados mais interessantes, como as pontas 1, 2 e 3. Os ensaios com tensão alternada devem ser realizados em condições mais controladas, observando-se mais variáveis que possam influenciar a tensão disruptiva. Na parte de simulação pode ser sugerido fazer as simulações considerando a formação de cargas no espaço, podendo assim simular todo o processo de formação da descarga. Com estas simulações podem ser obtidos valores de tensão disruptivas que podem ser comparadas com os valores obtidos em ensaios.

Espera-se então que este trabalho possa contribuir para o desenvolvimento de novos trabalhos e projetos.

# ANEXO A

Os resultados das simulações das pontas e condutores pelo Método dos Elementos Finitos estão nos gráficos abaixo. Separados gráficos de distribuição de potencial (V) e por distribuição de campo elétrico (E).

## PONTA 1 - V

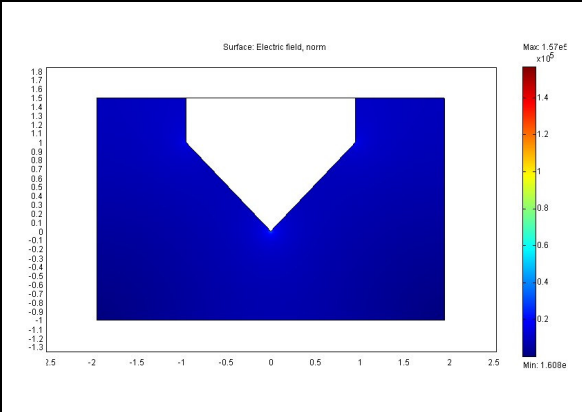
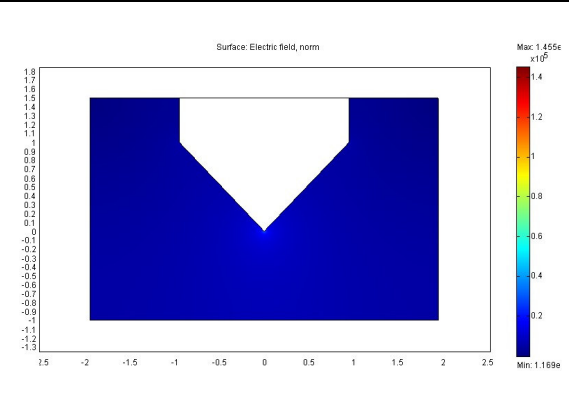


PONTA 1 - E

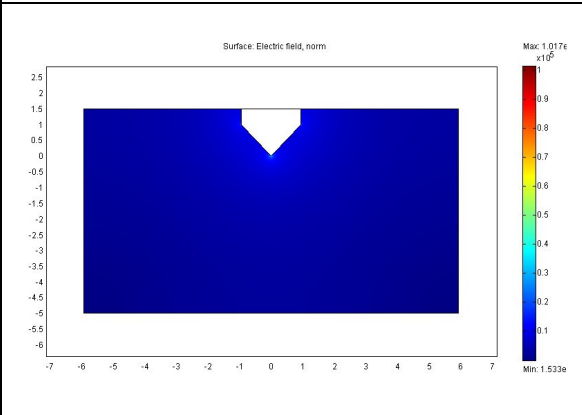
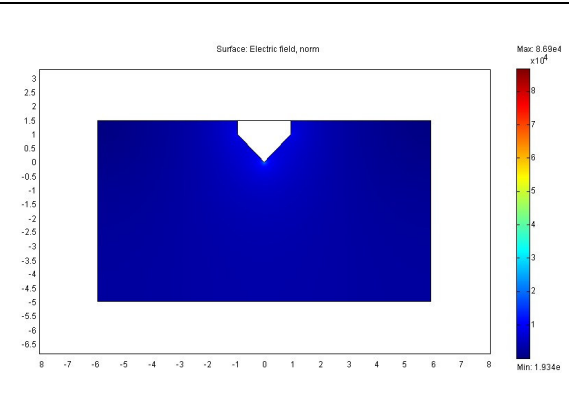
SEM PAREDE

COM PAREDE

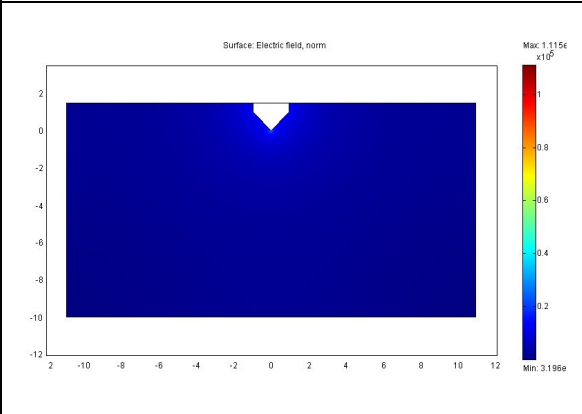
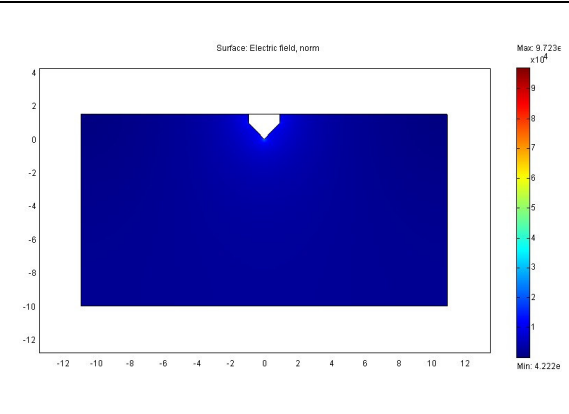
1 cm



5 cm



10 cm

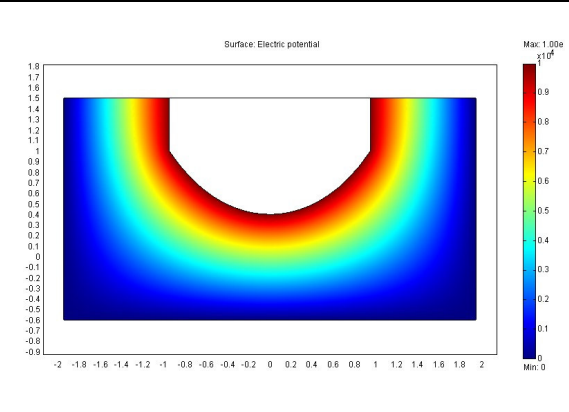
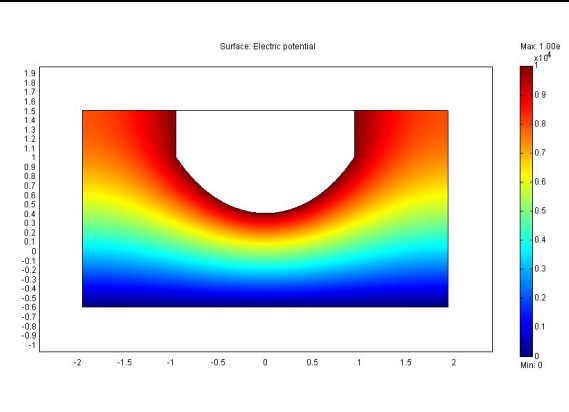


PONTA 2 - V

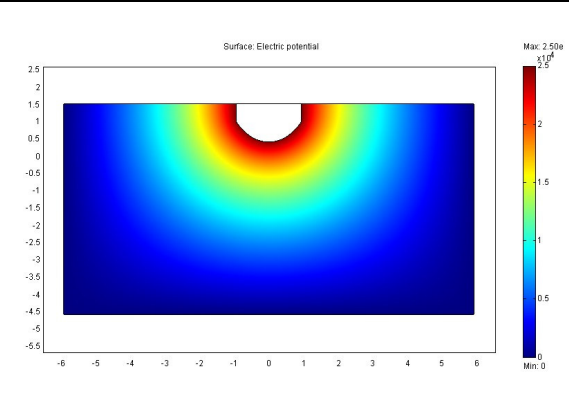
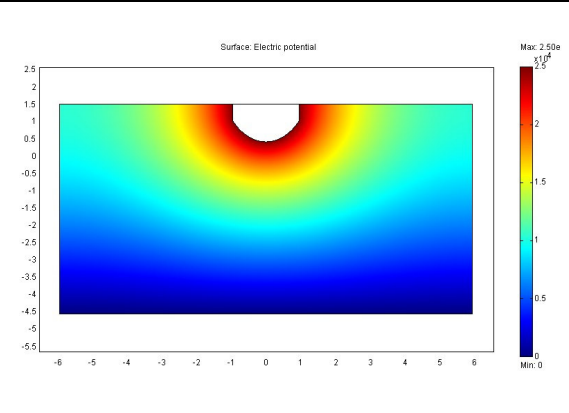
SEM PAREDE

COM PAREDE

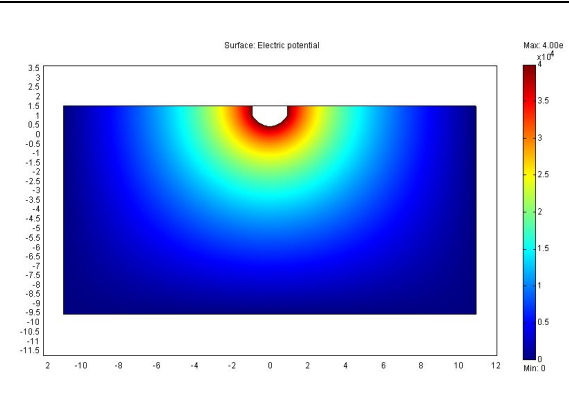
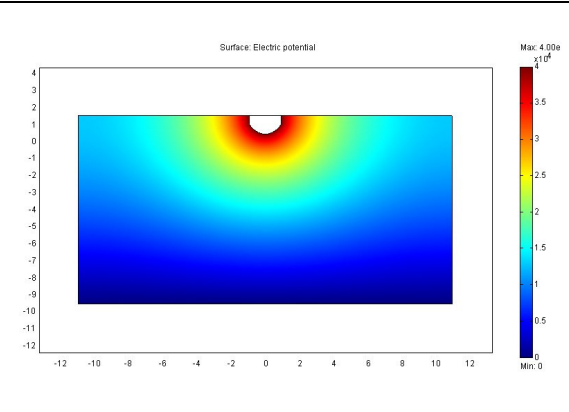
1 cm



5 cm



10 cm

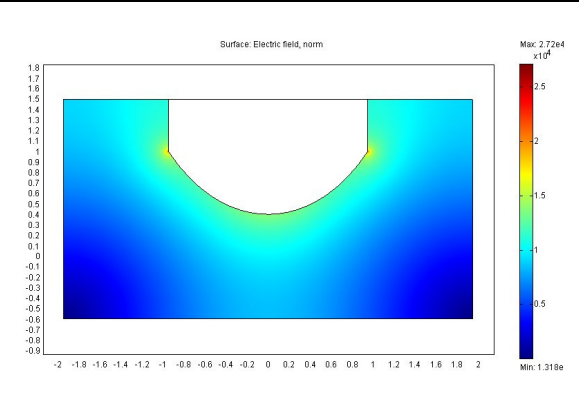
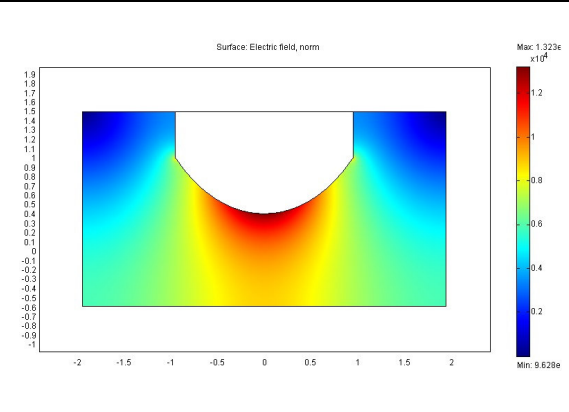


PONTA 2 - E

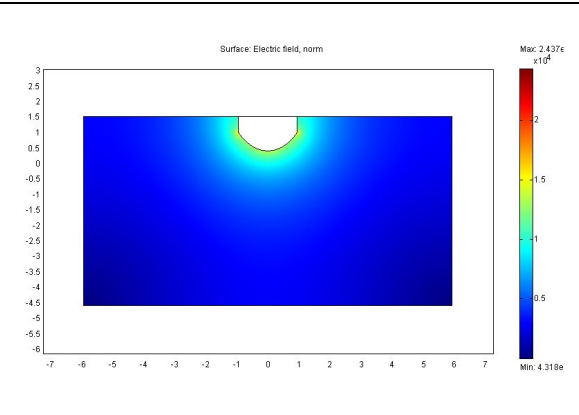
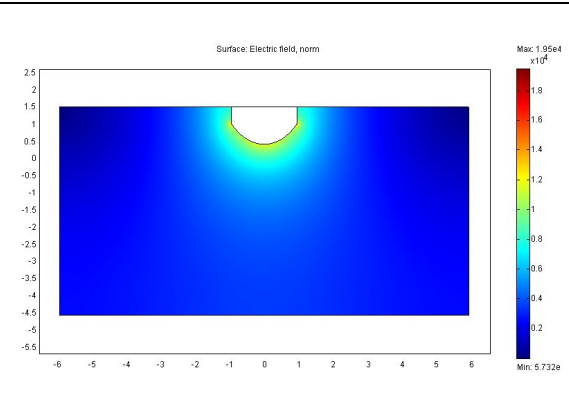
SEM PAREDE

COM PAREDE

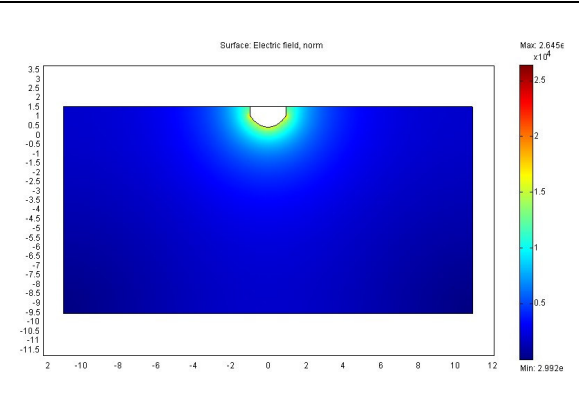
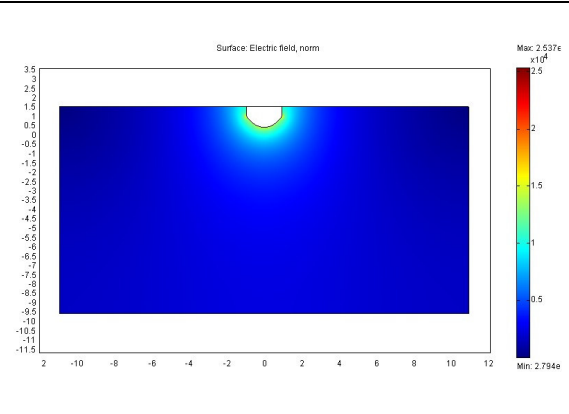
1 cm



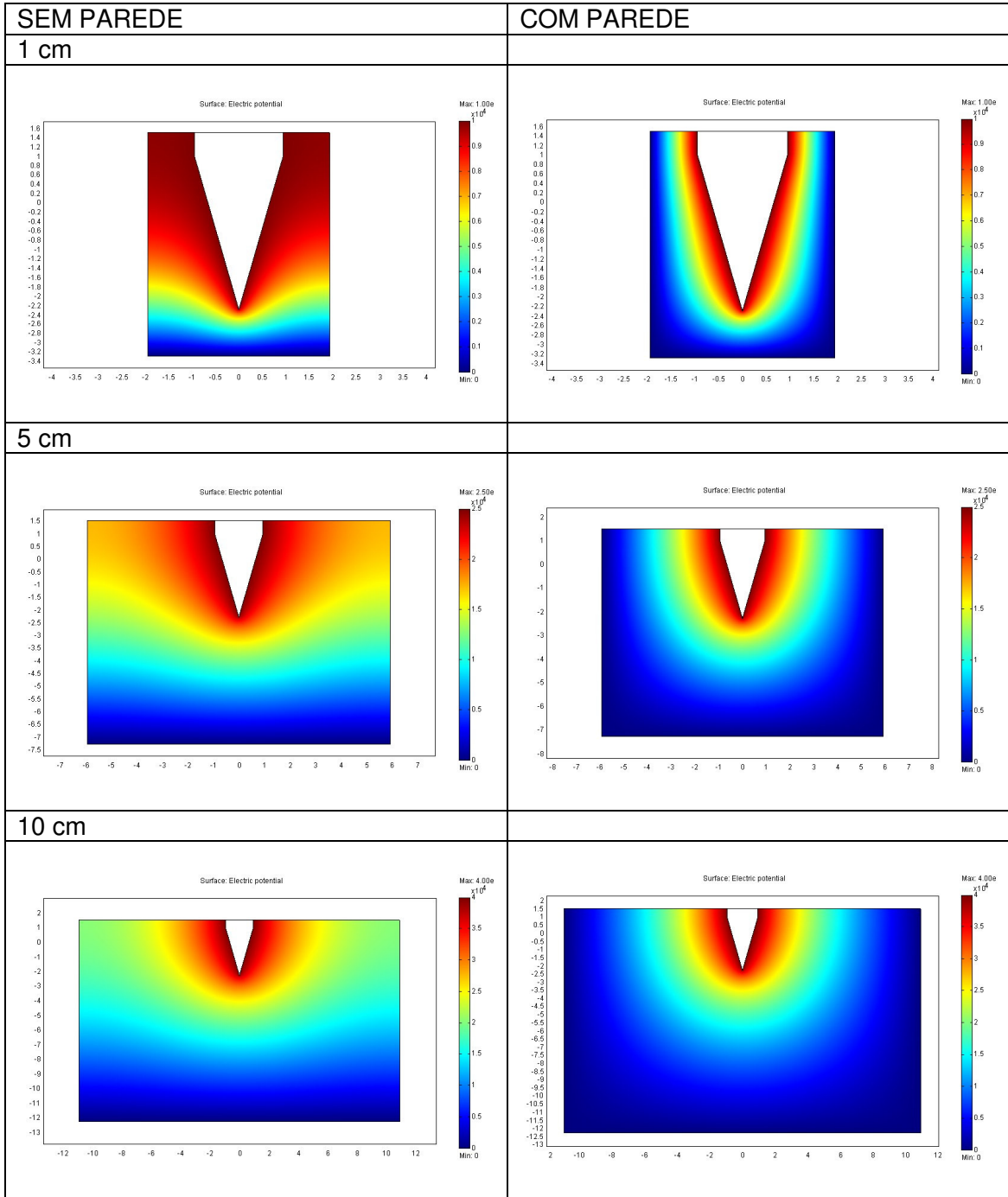
5 cm



10 cm



PONTA 3 - V

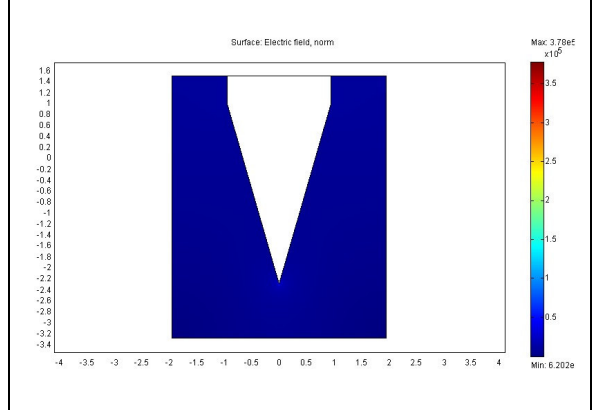
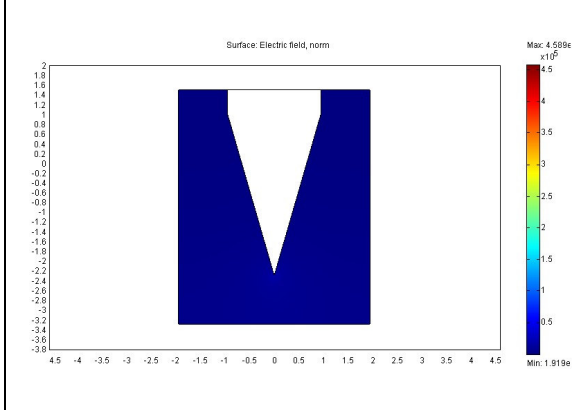


PONTA 3 - E

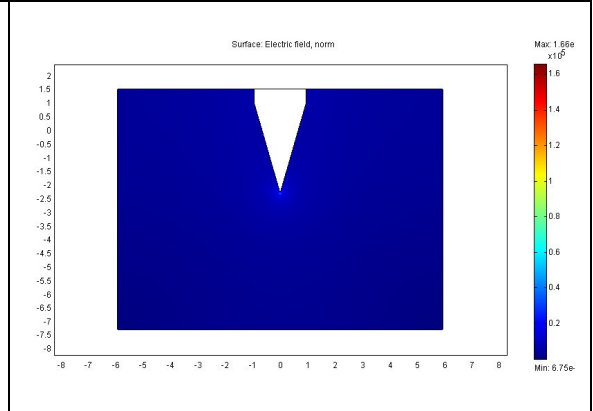
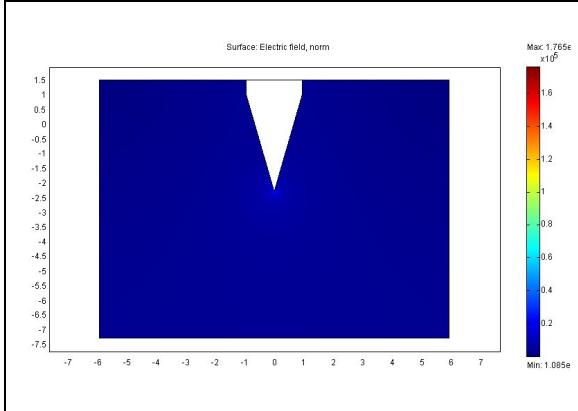
SEM PAREDE

COM PAREDE

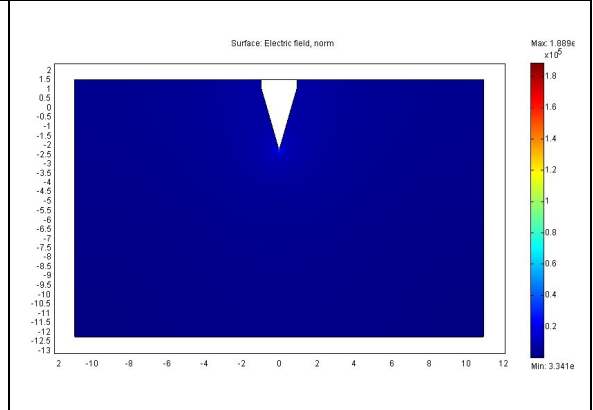
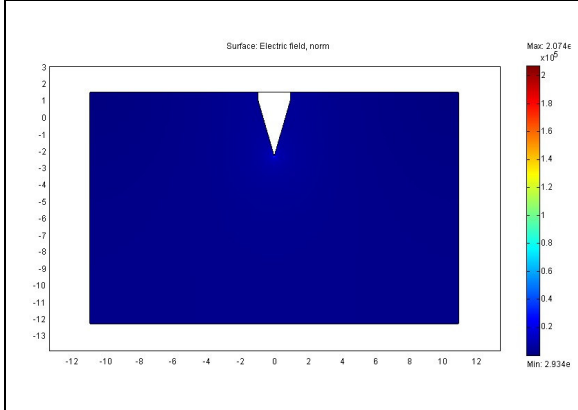
1 cm



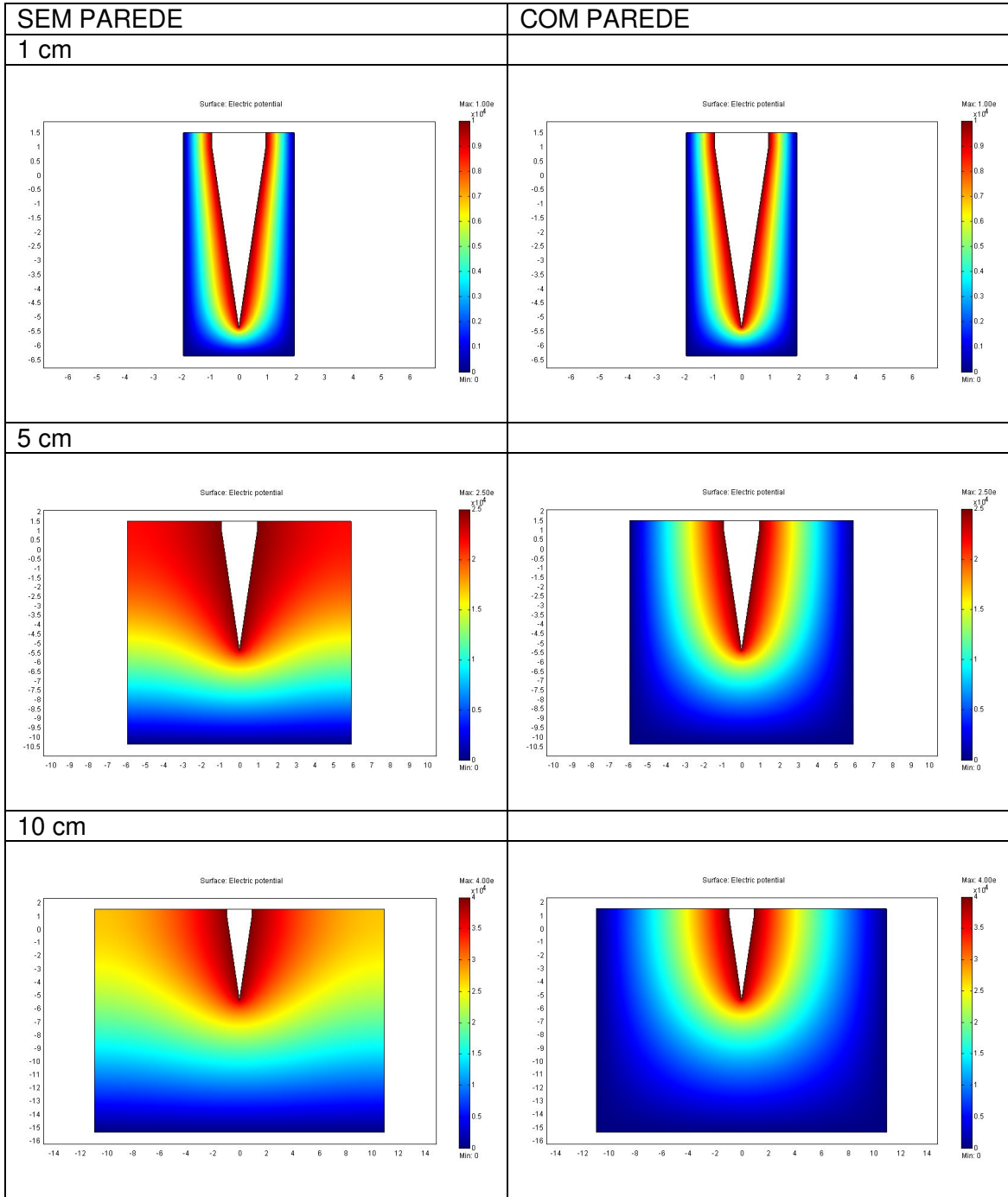
5 cm



10 cm



PONTA 4 - V



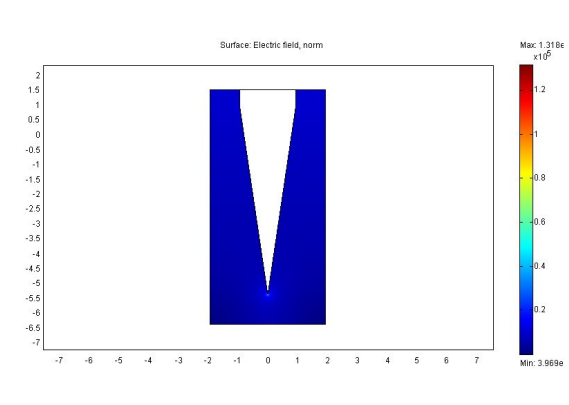
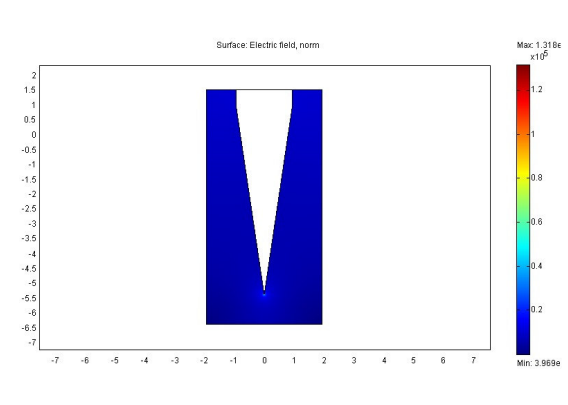


PONTA 3 - E

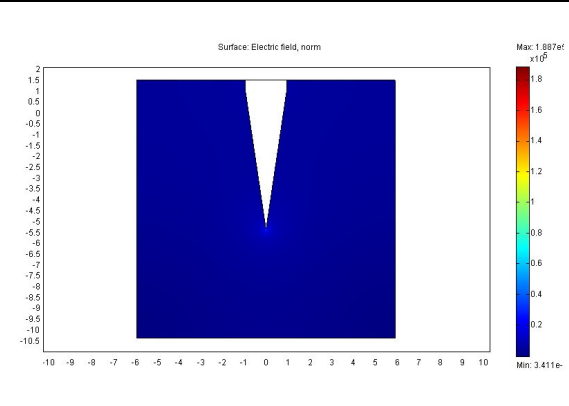
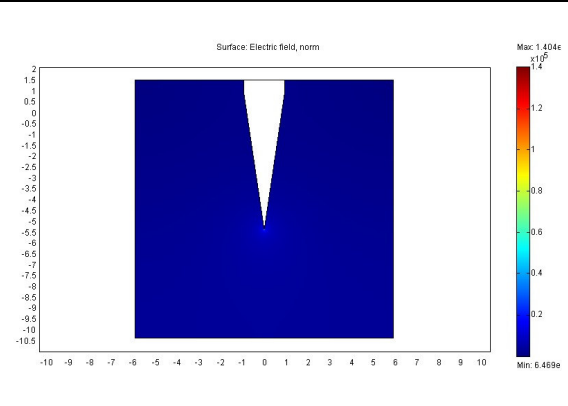
SEM PAREDE

COM PAREDE

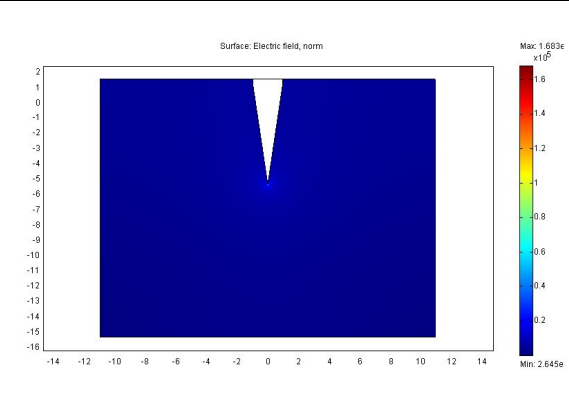
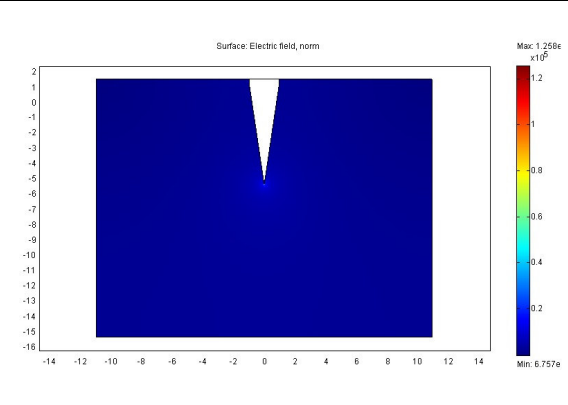
1 cm



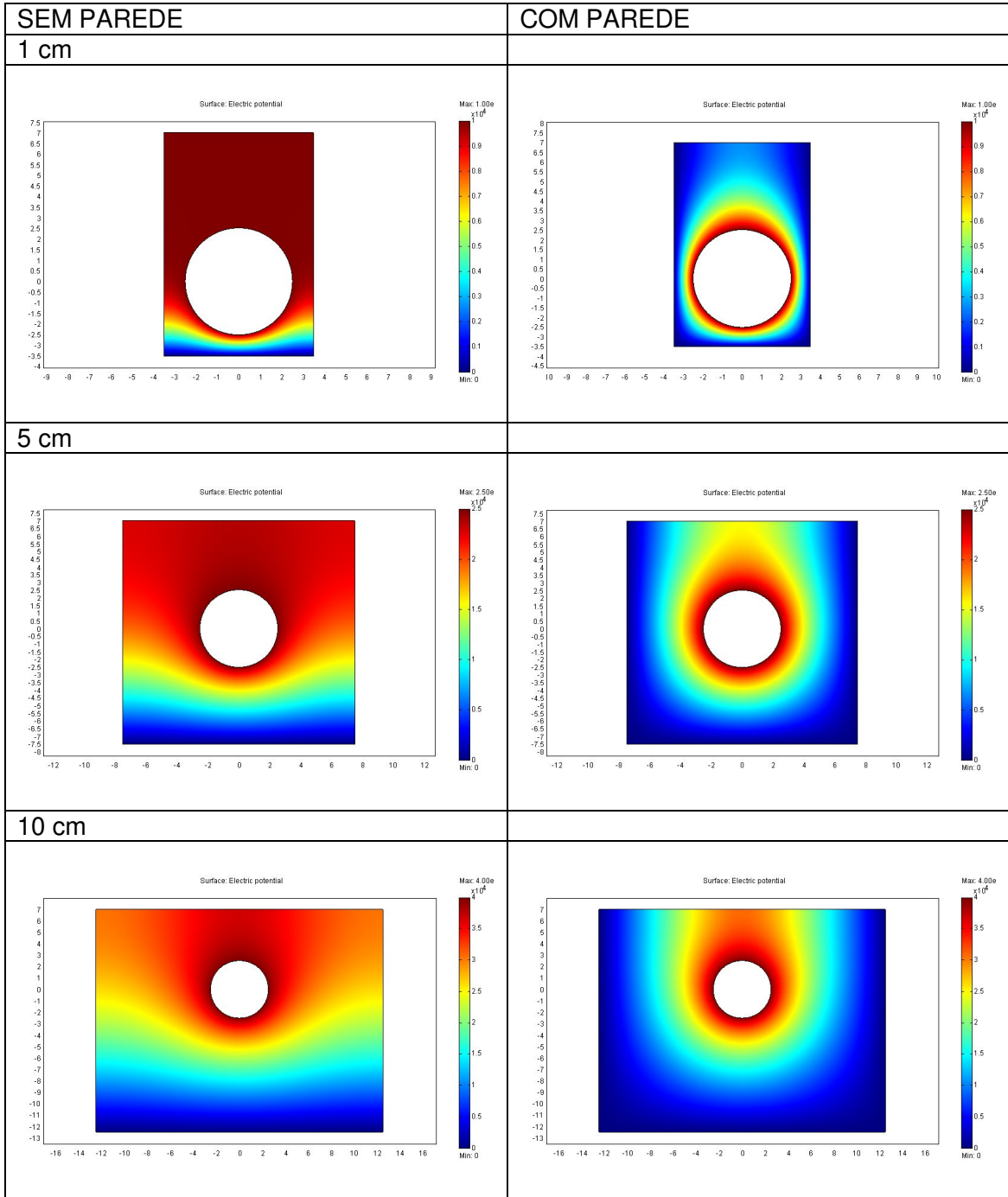
5 cm



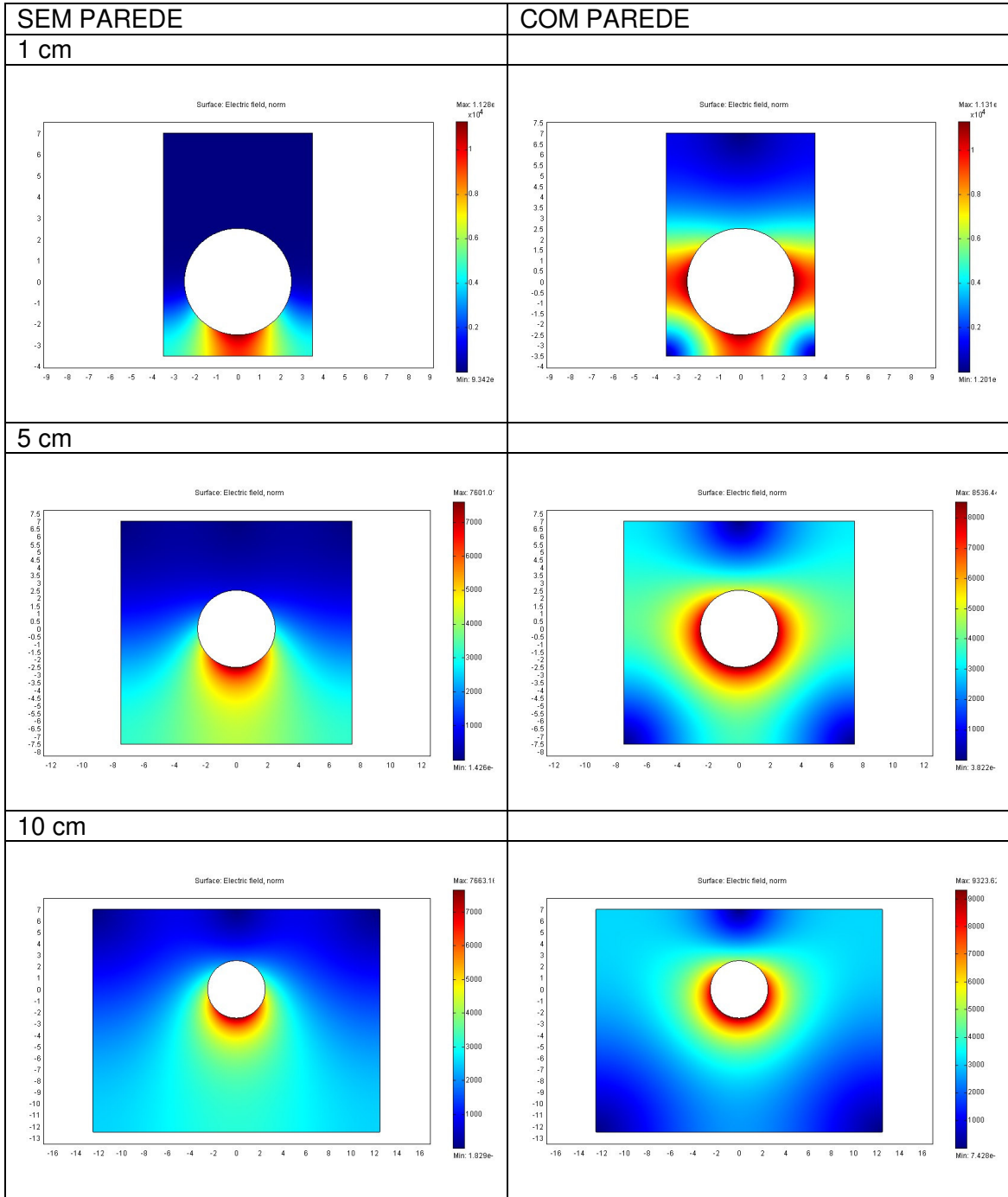
10 cm



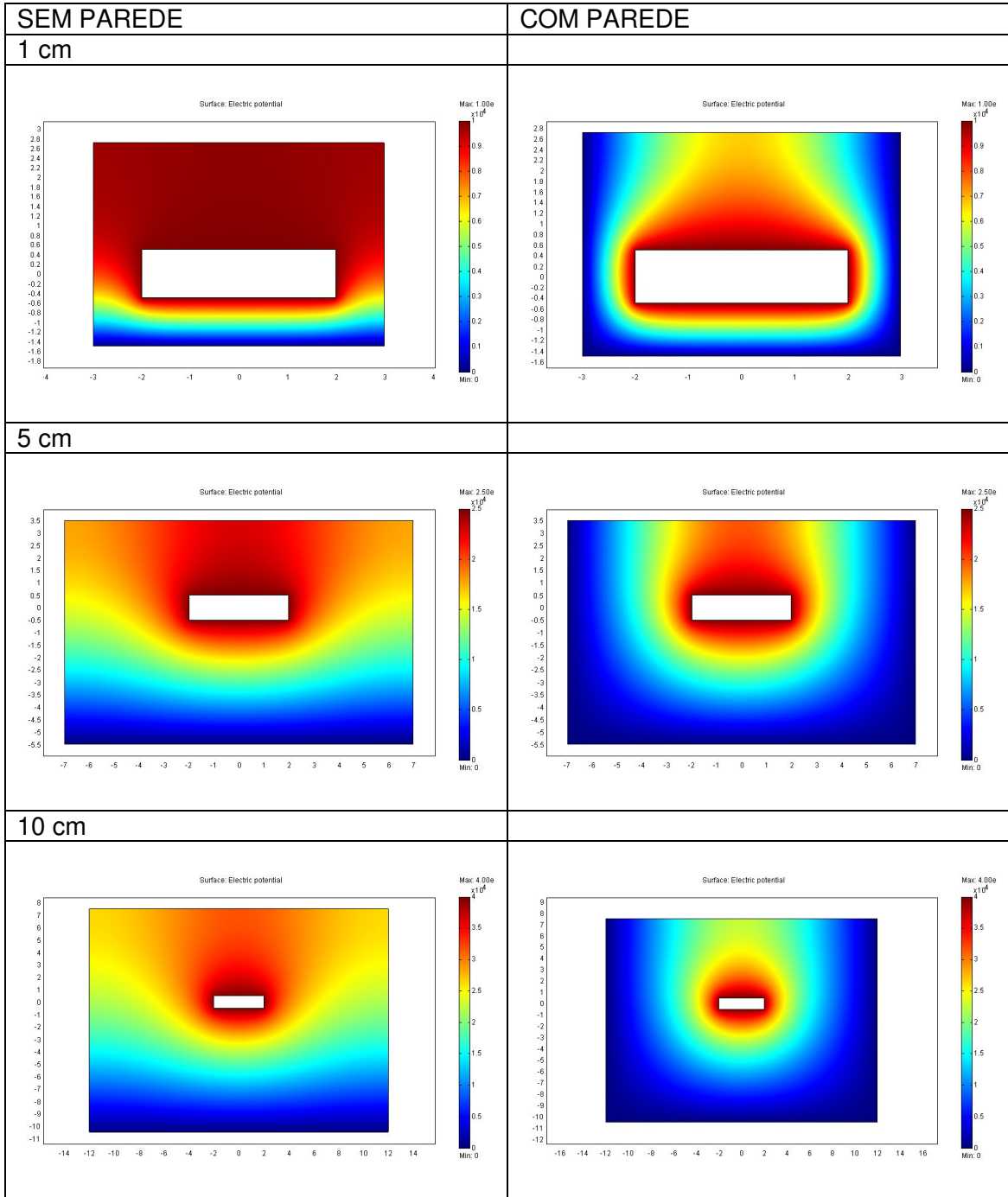
TUBO - V



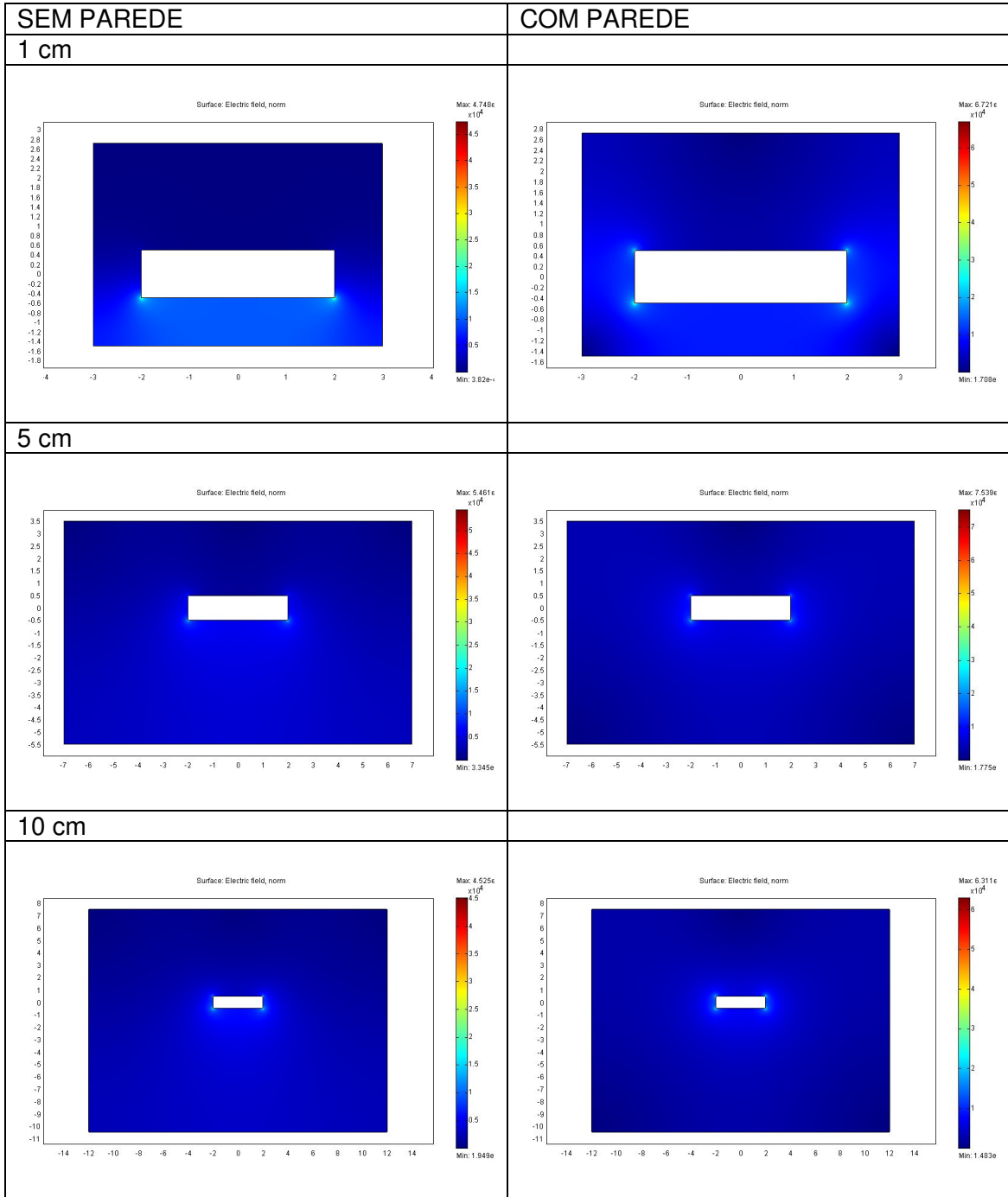
TUBO - E



# BARRA - V



# BARRA - E



## ANEXO B

As figuras B.1 a B.5 mostram a distribuição de campo elétrico em função do espaçamento de cada ponta e condutor, para os 3 valores de espaçamento ao ar livre.

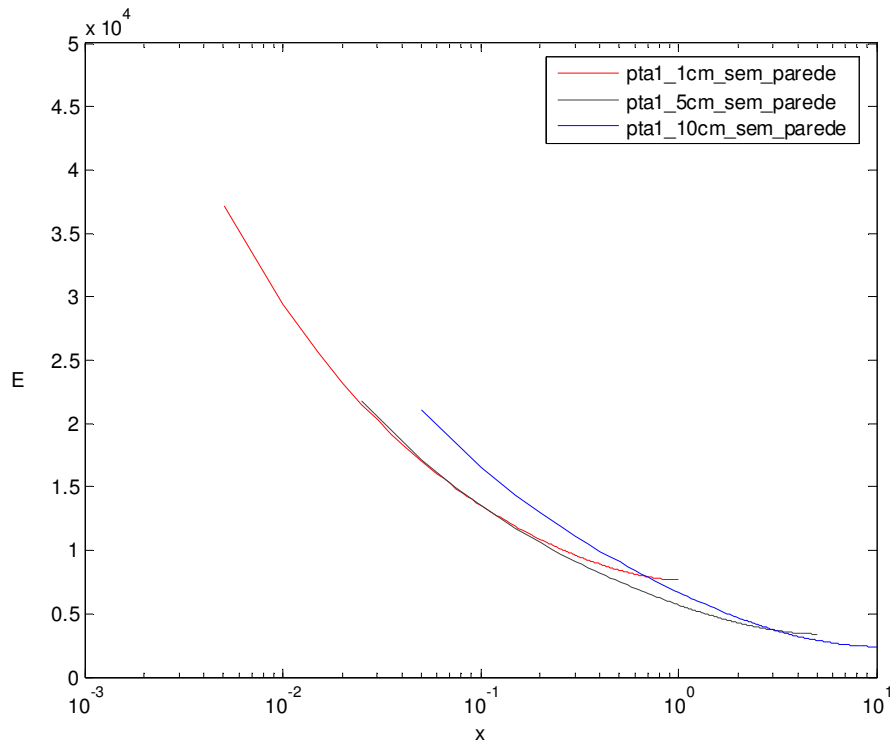


Figura B.1 - Ponta 1 em todos os espaçamentos ao ar livre

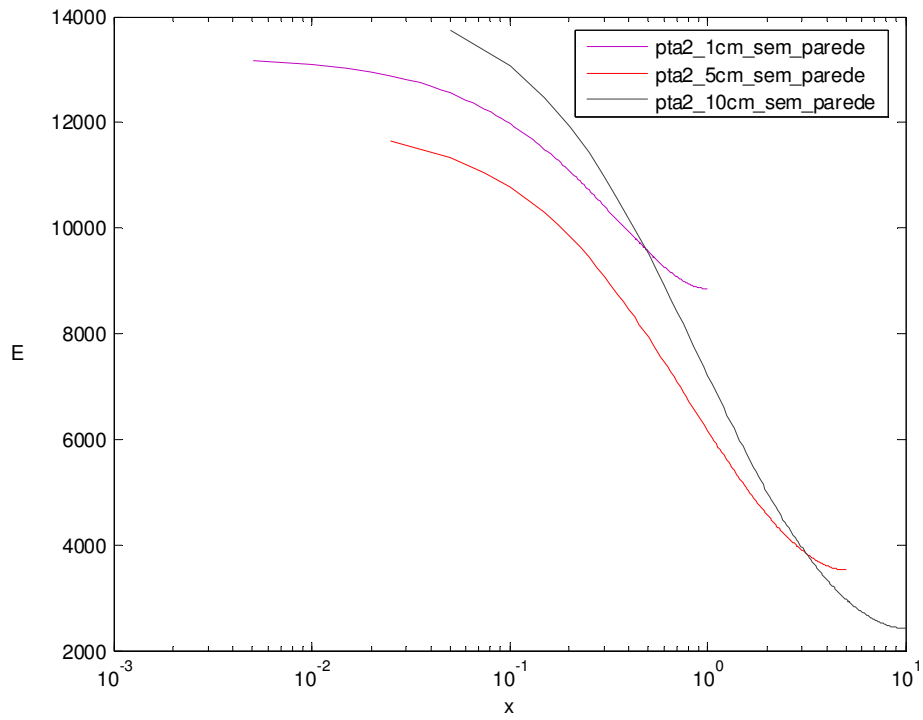


Figura B.2 - Ponta 2 em todos os espaçamentos ao ar livre

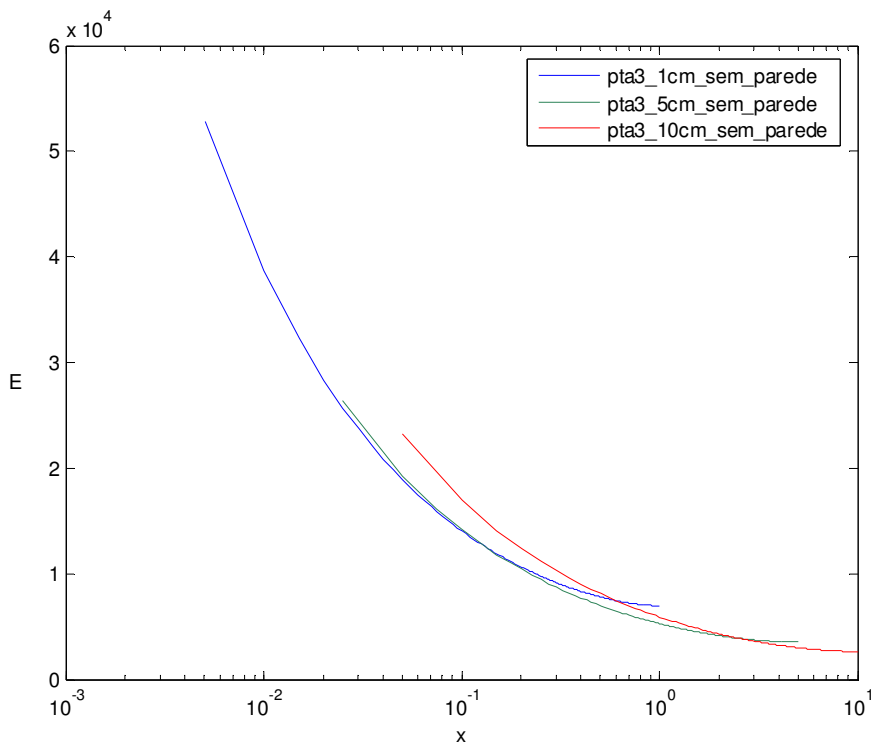


Figura B.3 - Ponta 3 em todos os espaçamentos ao ar livre

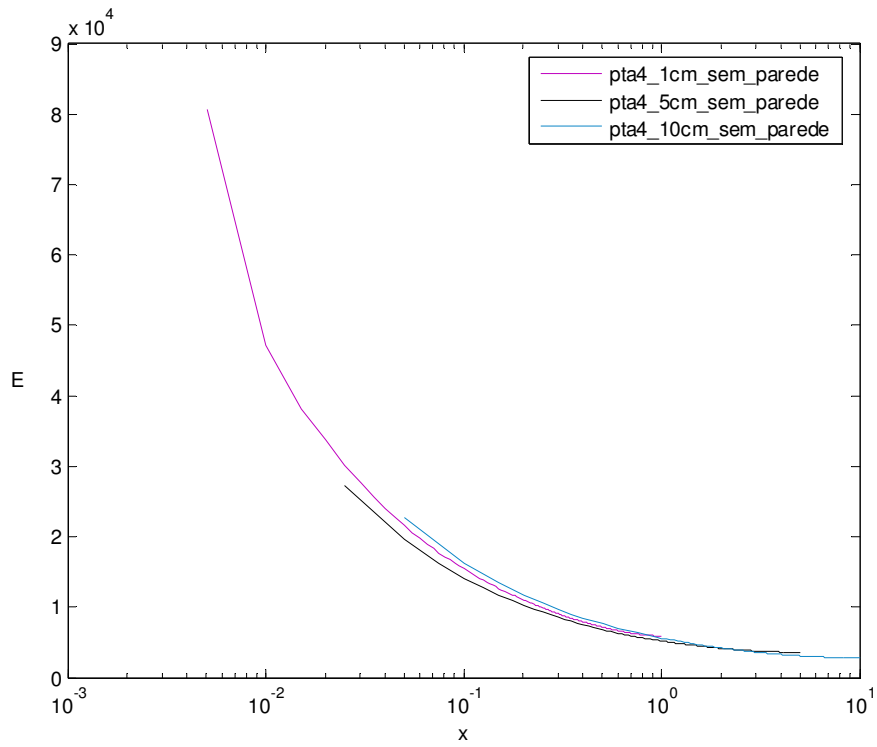


Figura B.4 - Ponta 4 em todos os espaçamentos ao ar livre

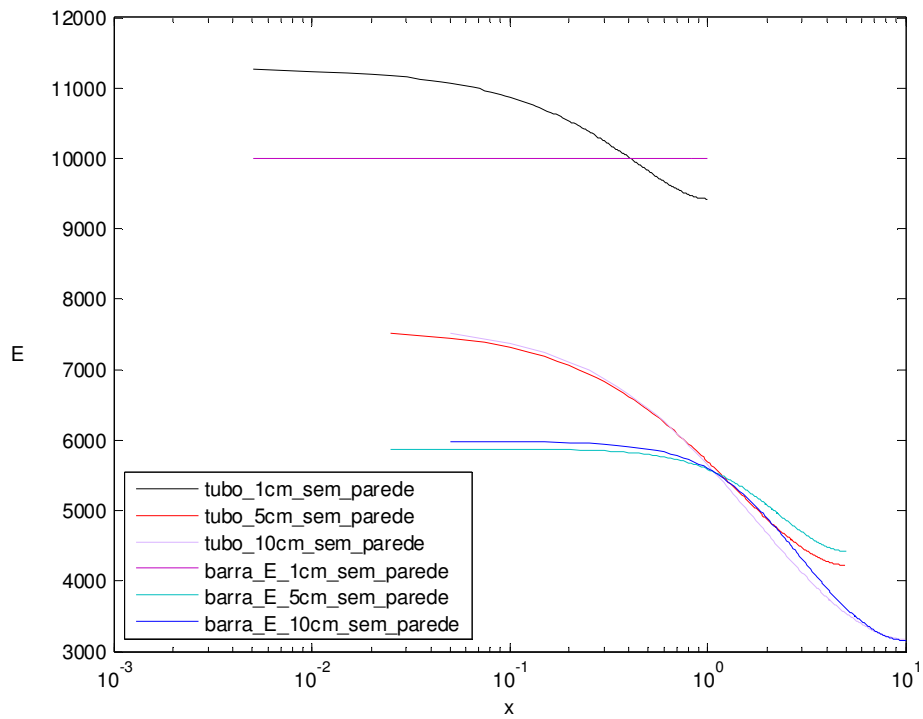


Figura B.5 - Tubo e barra em todos os espaçamentos ao ar livre



## ANEXO C

Resultados das simulações mostrando as diferenças entre a distribuição de campo elétrico ao longo do espaçamento entre os eletrodos para a situação sem e com paredes aterradas (ar livre e confinado), figuras C.1 a C.11.

A diferença causada pela presença das paredes metálicas na distribuição de campo elétrico, ao longo do espaçamento de 1 cm, da ponta 4 é imperceptível.

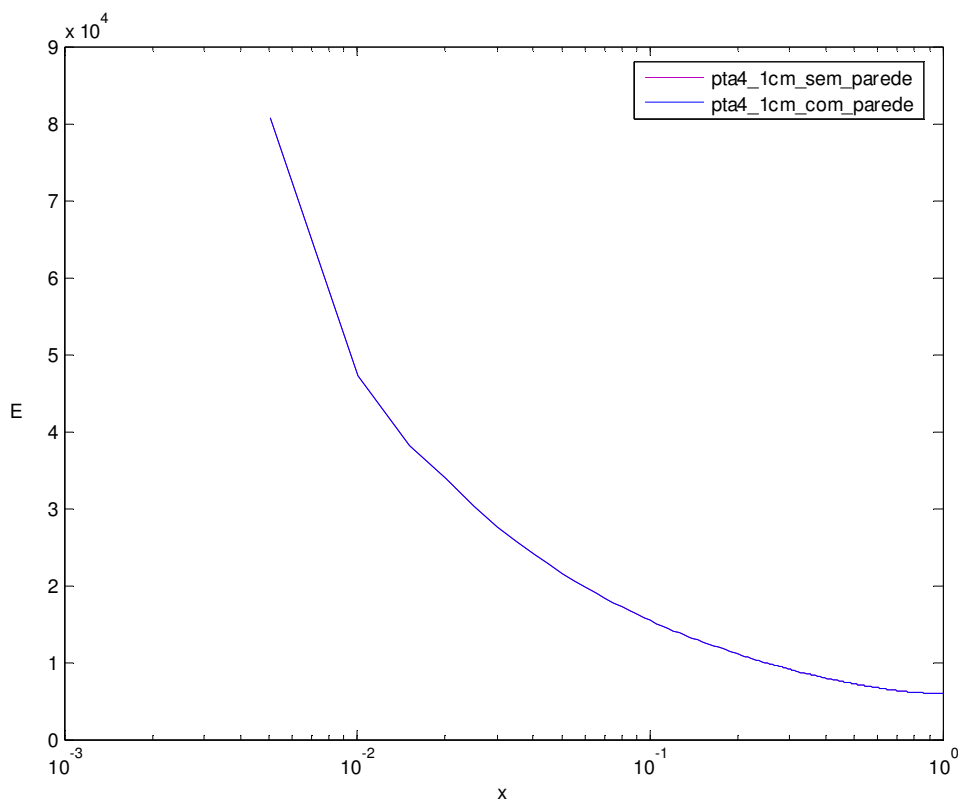


Figura C.1 - Ponta 4 com espaçamento de 1cm com e sem paredes aterradas

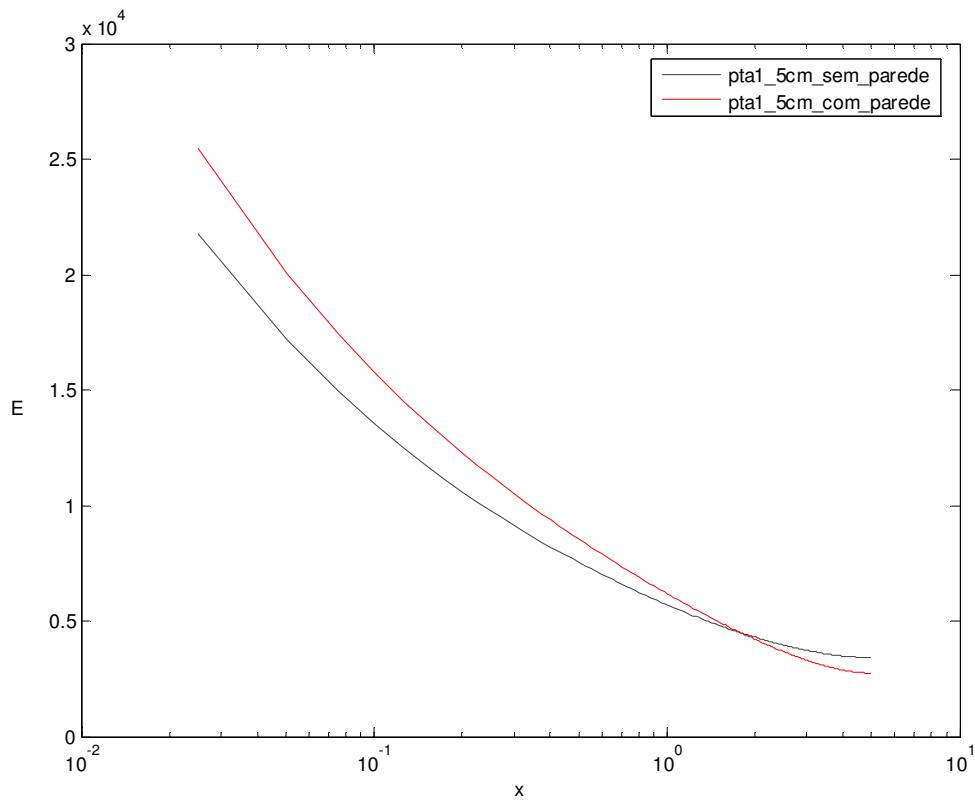


Figura C.2 - Ponta 1 com espaçamento de 5cm com e sem paredes aterradas

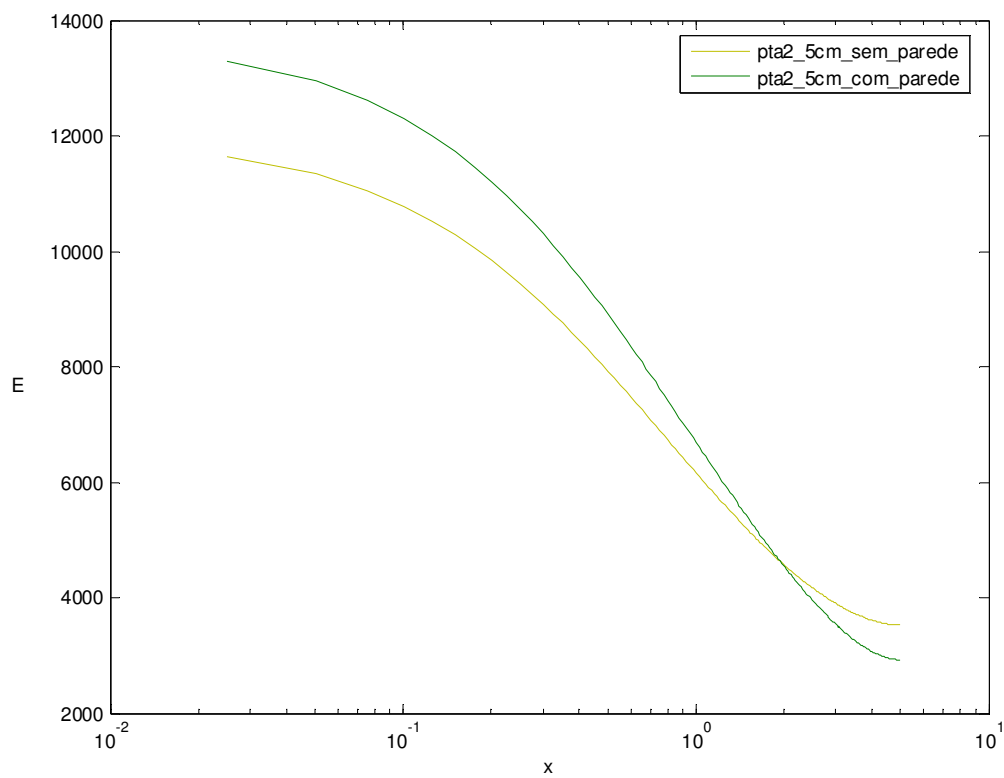


Figura C.3 - Ponta 2 com espaçamento de 5cm com e sem paredes aterradas

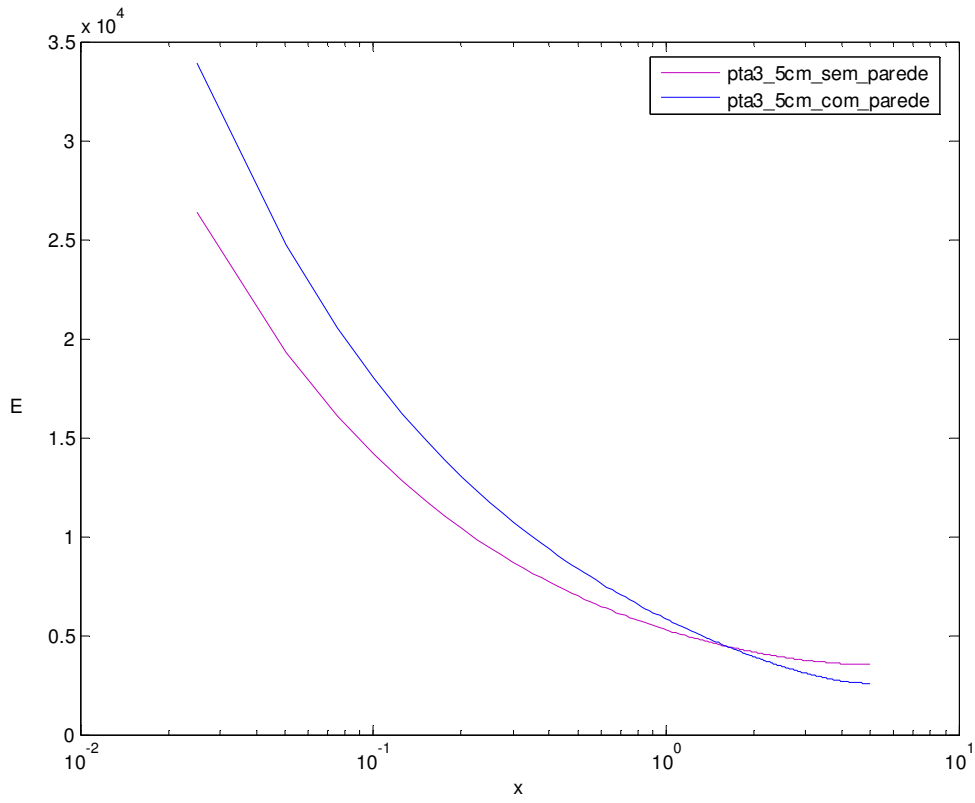


Figura C.4 - Ponta 3 com espaçamento de 5cm com e sem paredes aterradas

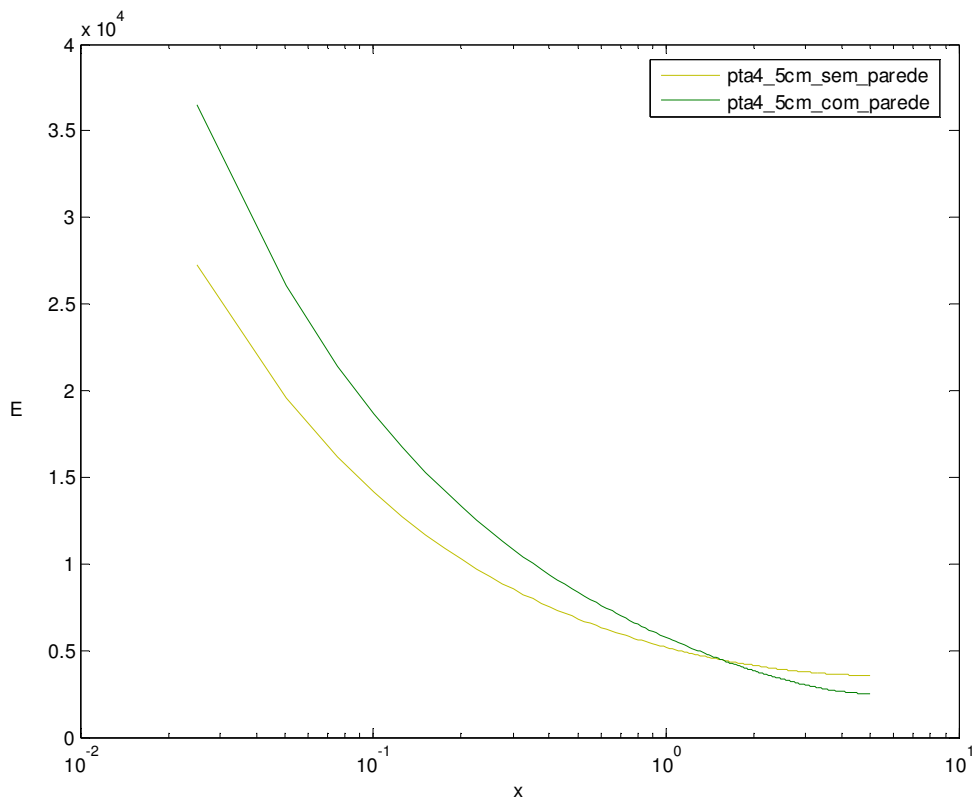


Figura C.5 - Ponta 4 com espaçamento de 5cm com e sem paredes aterradas

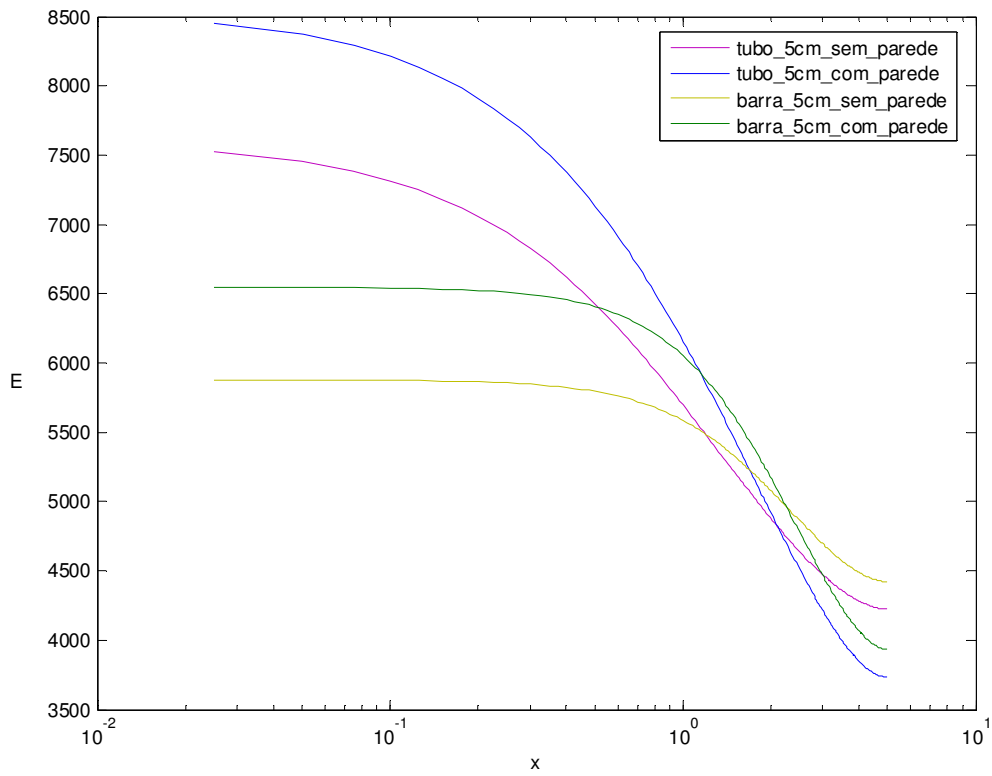


Figura C.6 - Tubo e barra com espaçamento de 5cm com e sem paredes aterradas

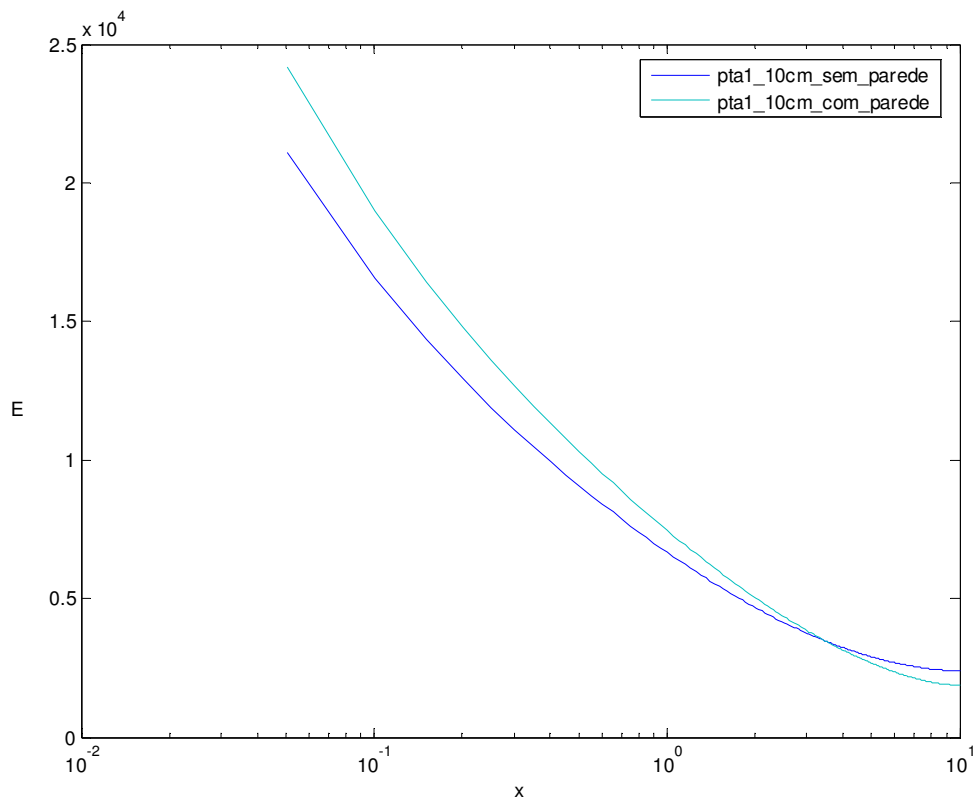


Figura C.7 - Ponta 1 com espaçamento de 10cm com e sem paredes aterradas

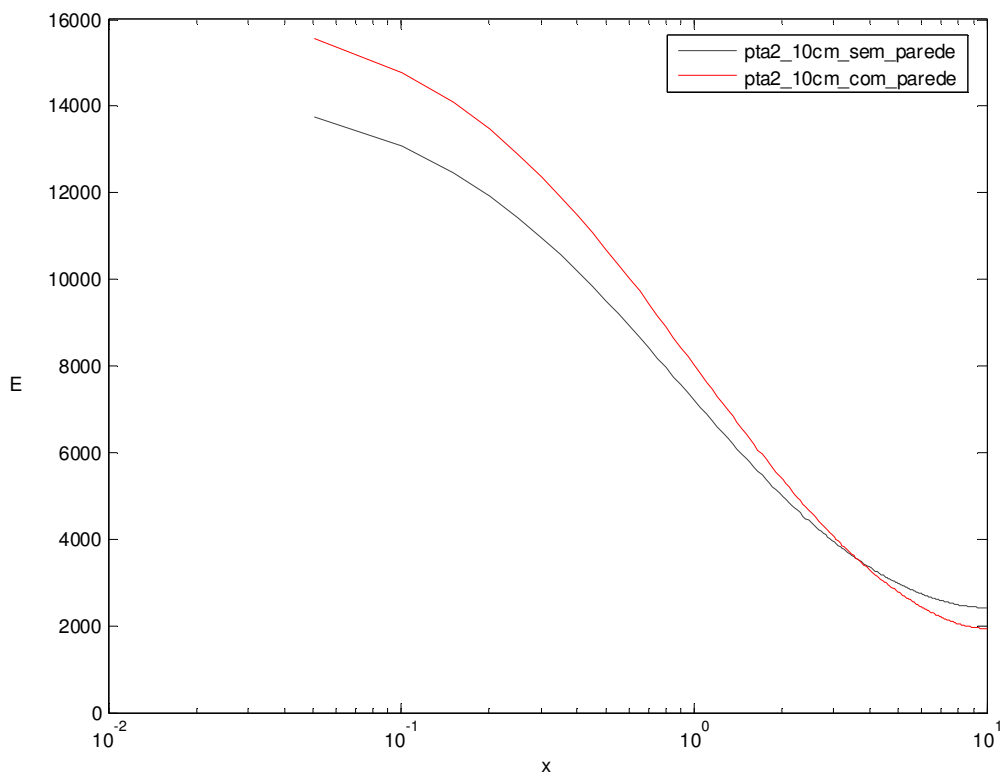


Figura C.8 - Ponta 2 com espaçamento de 10cm com e sem paredes aterradas

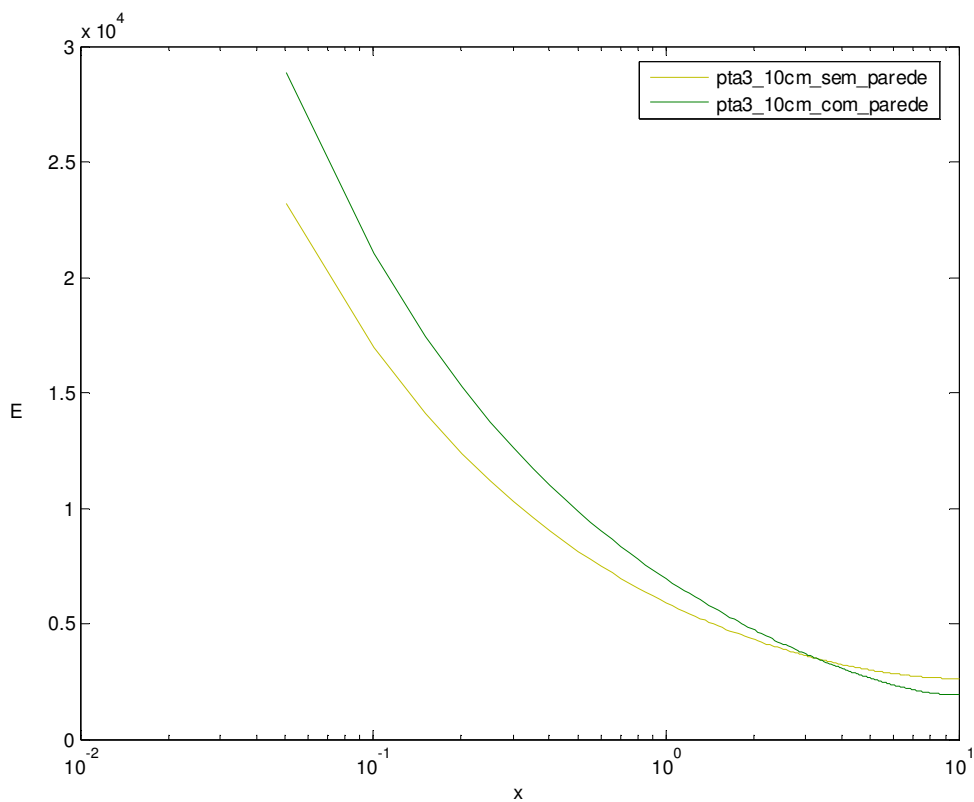


Figura C.9 - Ponta 3 com espaçamento de 10cm com e sem paredes aterradas

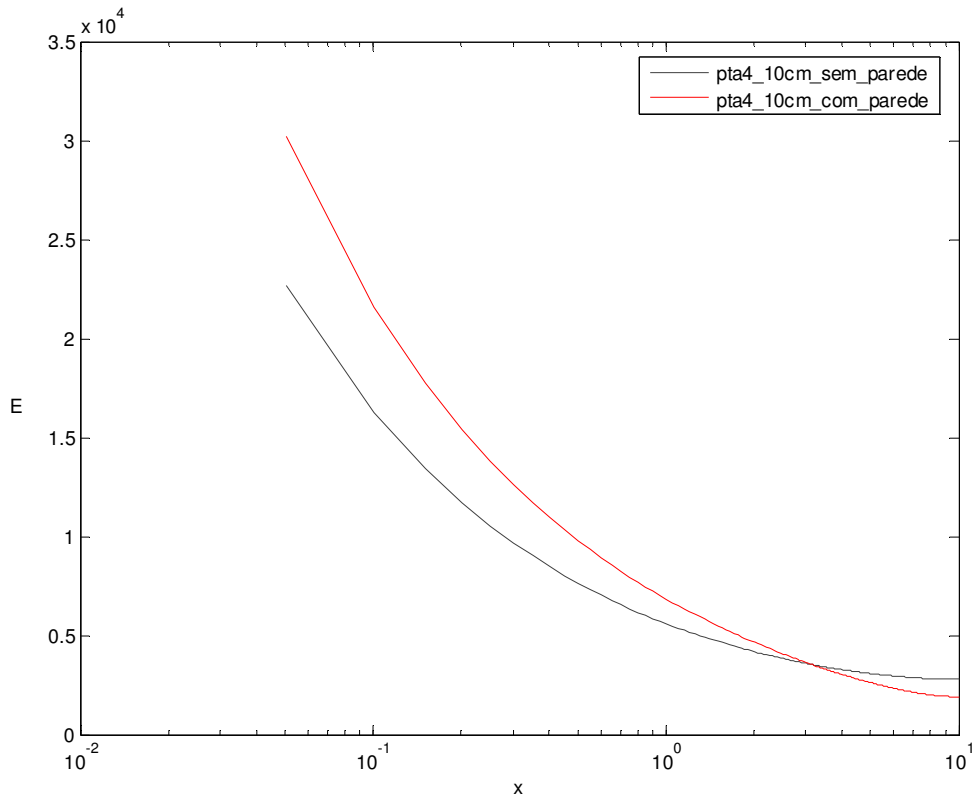


Figura C.10 - Ponta 4 com espaçamento de 10cm com e sem paredes aterradas

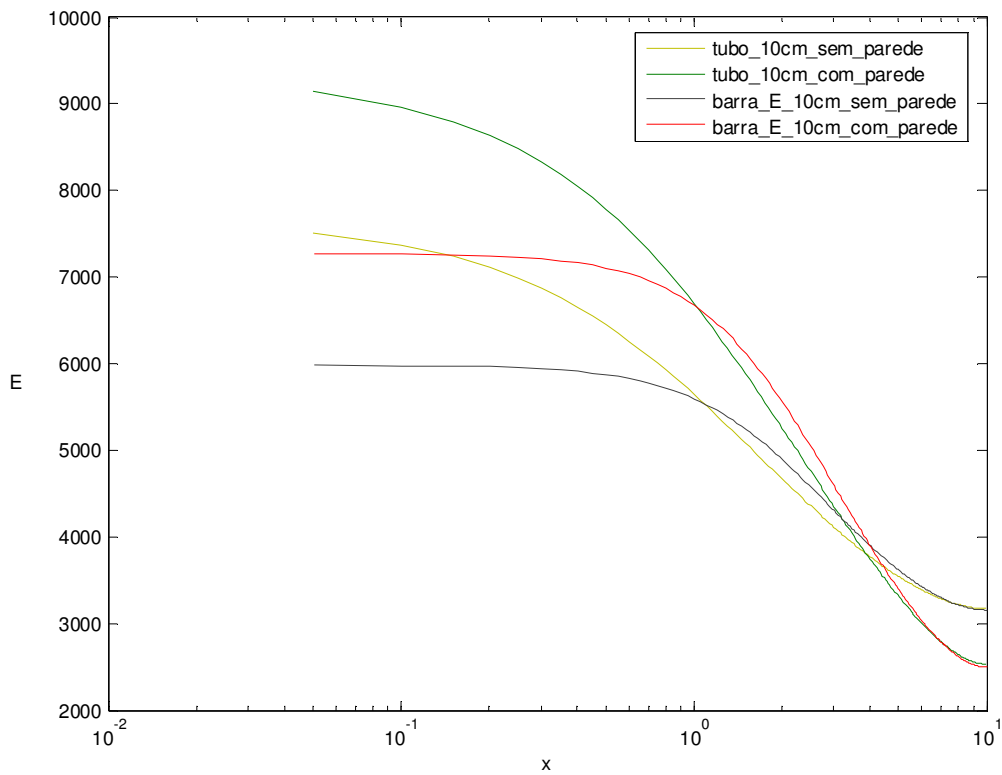


Figura C.11 - Tubo e barra com espaçamento de 10cm com e sem paredes aterradas

## ANEXO D

Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 1 ao ar livre estão nas figuras D.1 e D.2.

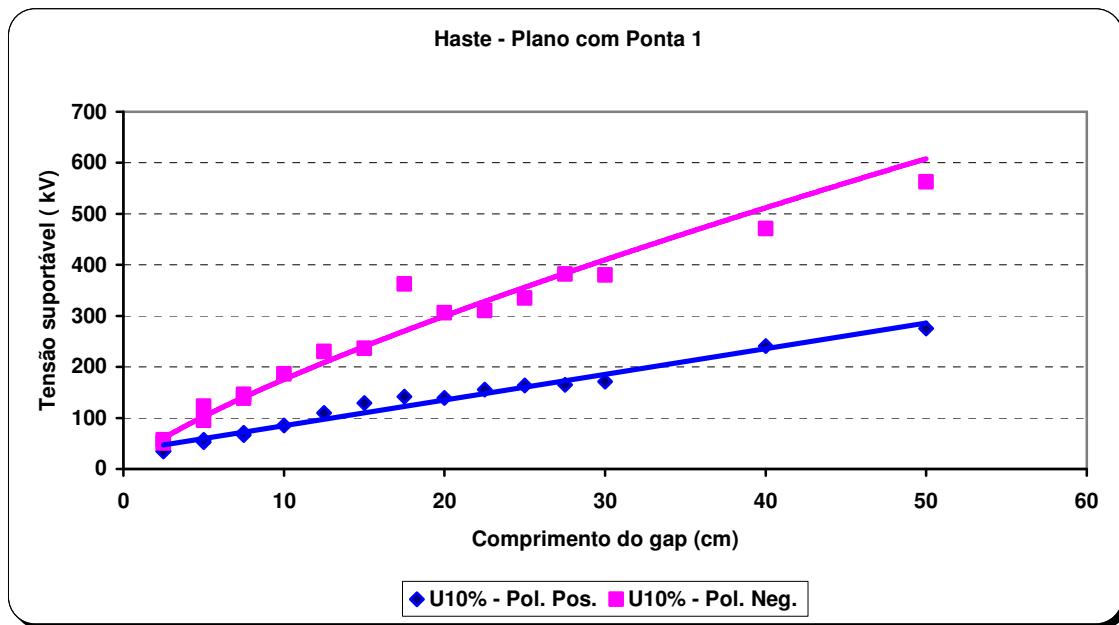


Figura D.1 - Configuração haste-plano com a ponta 1, tensão de impulso atmosférico

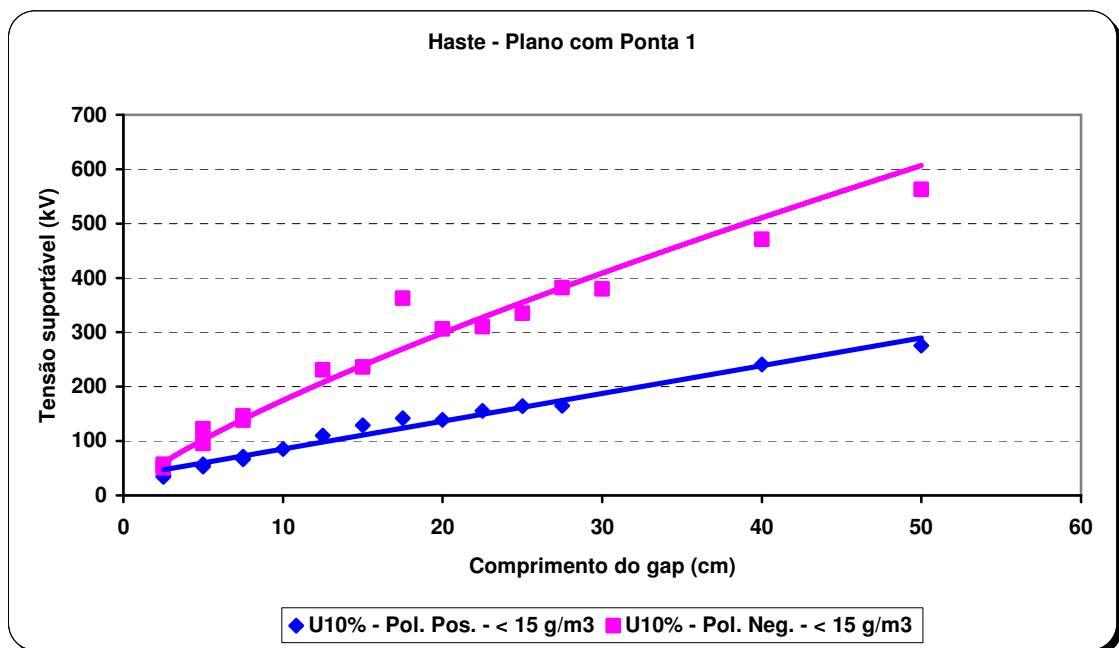


Figura D.2 - Configuração haste-plano com a ponta 1, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 2 ao ar livre estão nas figuras D.3 e D.4.

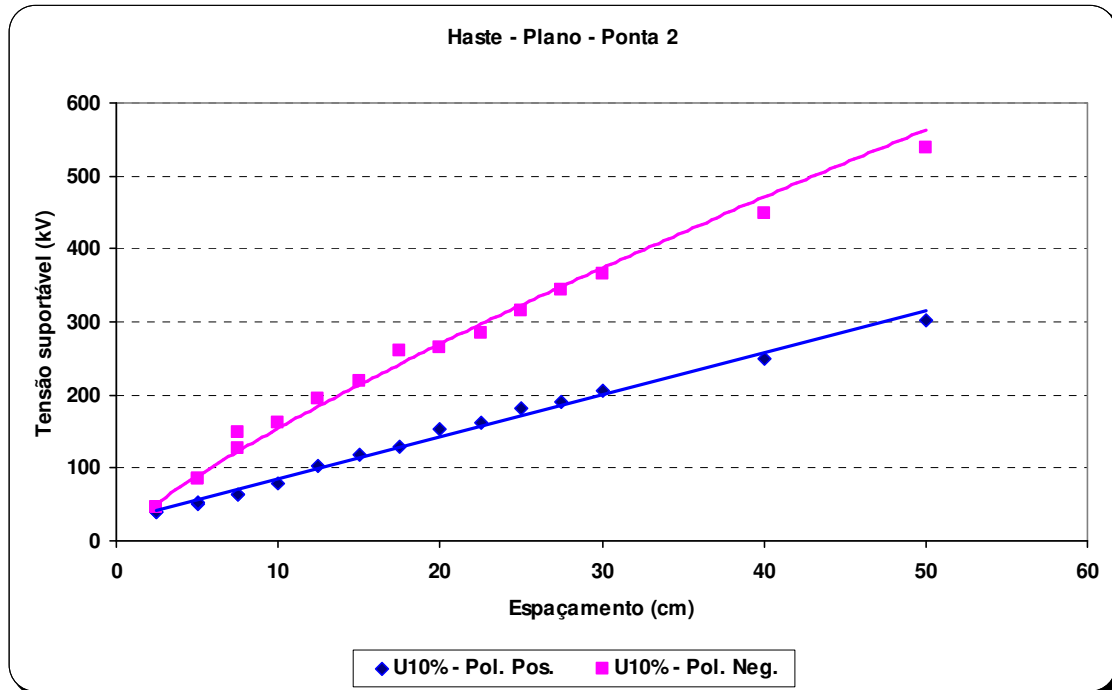


Figura D.3 - Configuração haste-plano com a ponta 2, tensão de impulso atmosférico

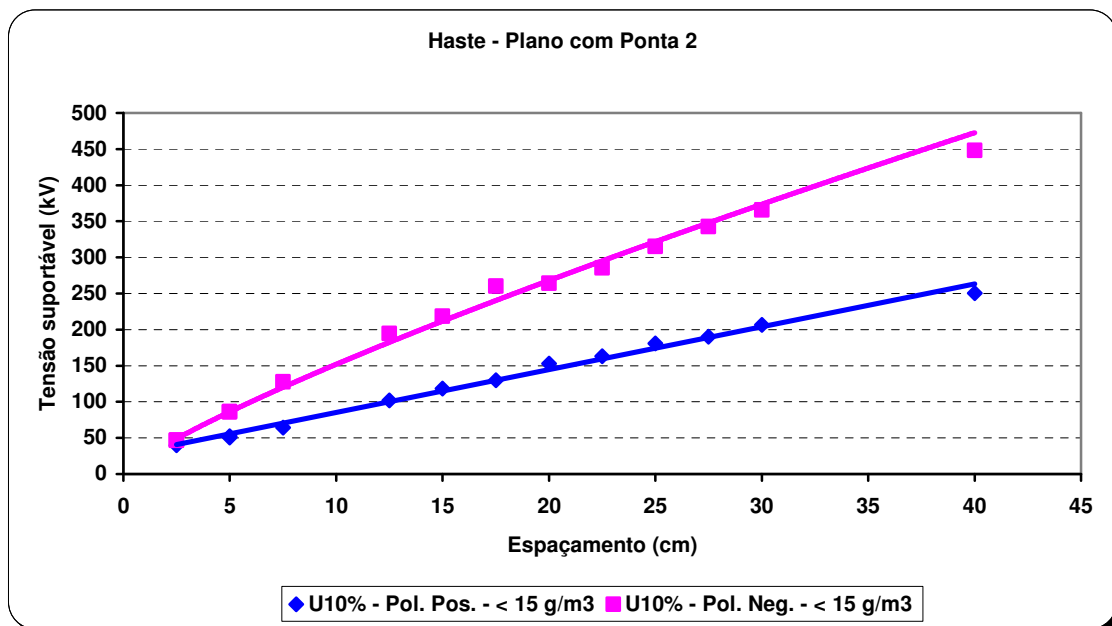


Figura D.4 - Configuração haste-plano com a ponta 2, tensão de impulso atmosférico



Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 3 ao ar livre estão nas figuras D.5 e D.6.

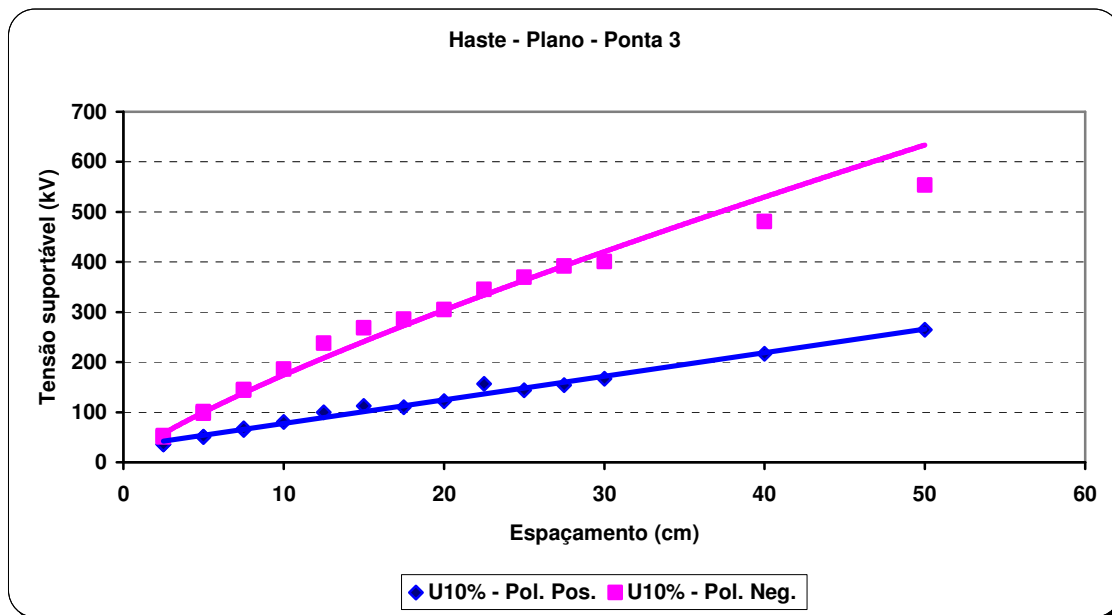


Figura D.5 - Configuração haste-plano com a ponta 3, tensão de impulso atmosférico

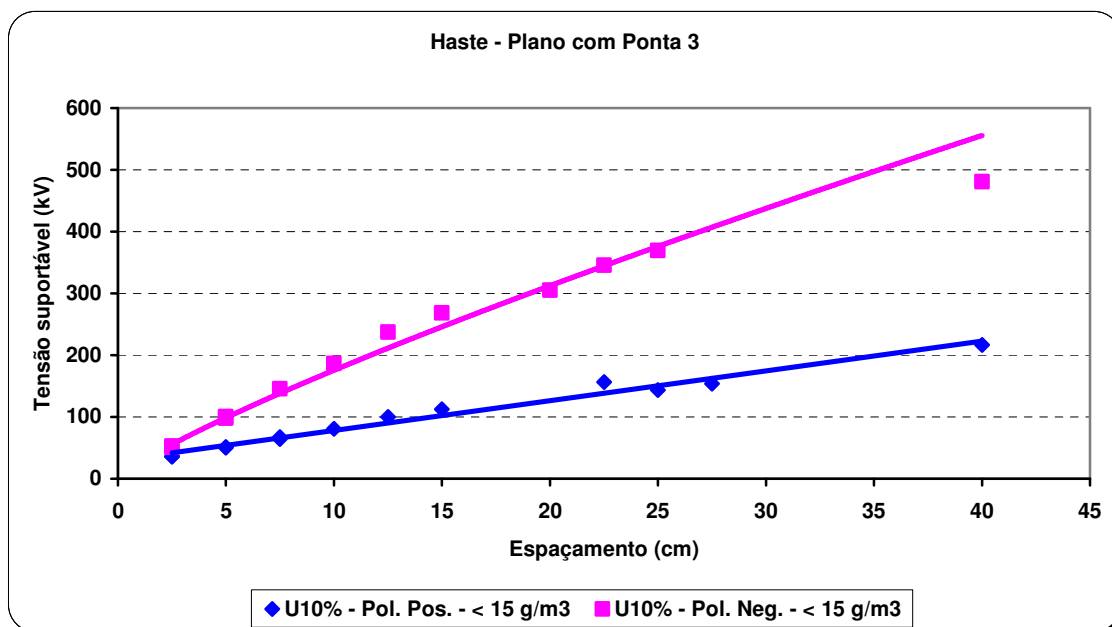


Figura D.6 - Configuração haste-plano com a ponta 3, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração haste-plano com a ponta 4 ao ar livre estão nas figuras D.7 e D.8.

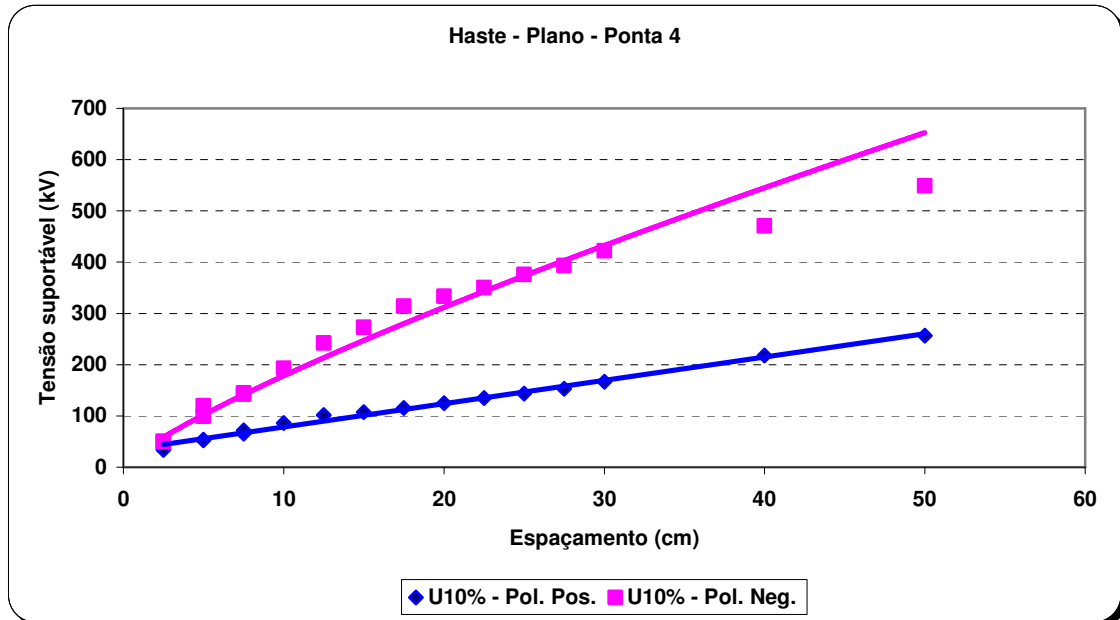


Figura D.7 - Configuração haste-plano com a ponta 4, tensão de impulso atmosférico

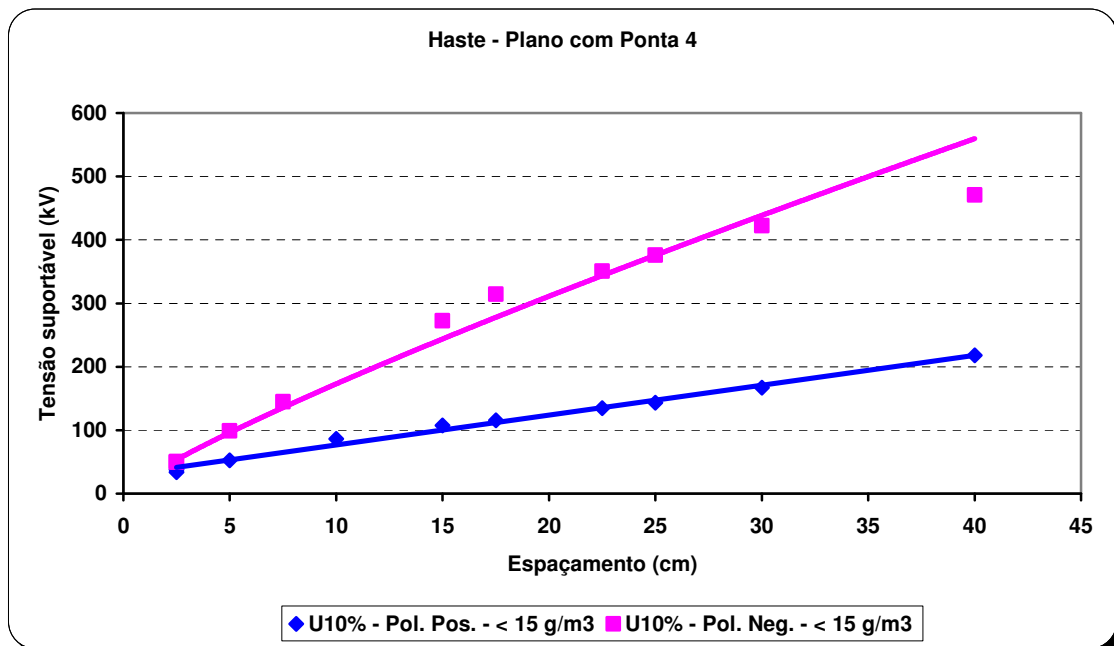


Figura D.8 - Configuração haste-plano com a ponta 4, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração barra-plano ao ar livre estão na figura D.9. Nestes gráficos as curvas de tendência traçadas foram do tipo linear para as duas polaridades.

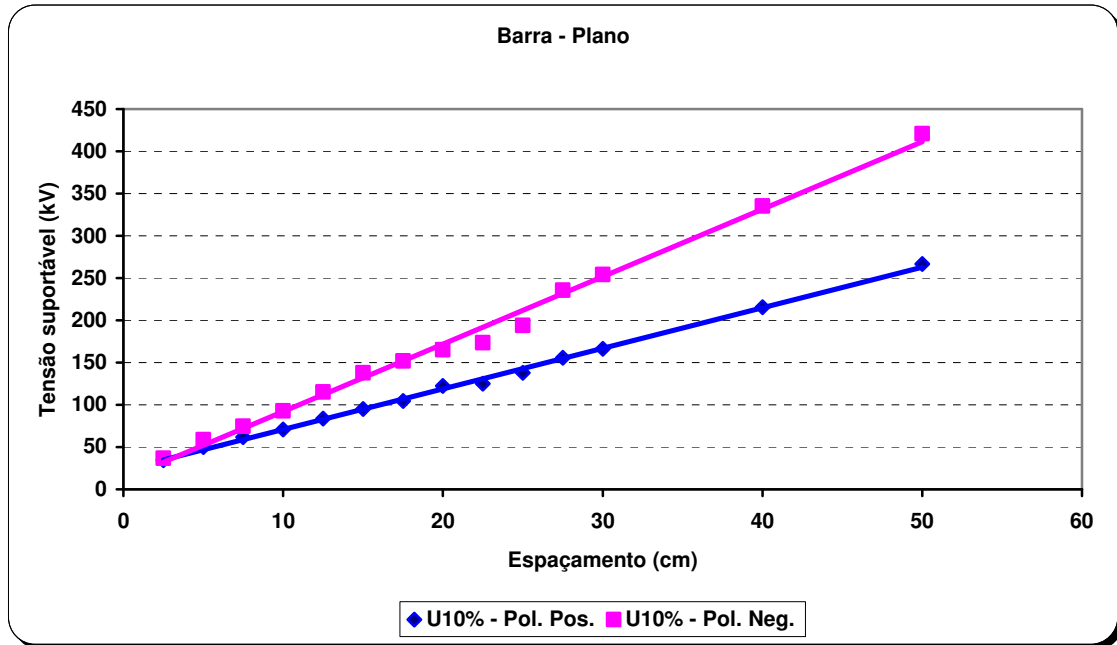


Figura D.9 - Configuração barra-plano, tensão de impulso atmosférico

Os resultados da configuração tubo-plano ao ar livre estão na figura D.10. O ajuste dos resultados obtidos para as duas polaridades foi do tipo  $y = x^a$ .

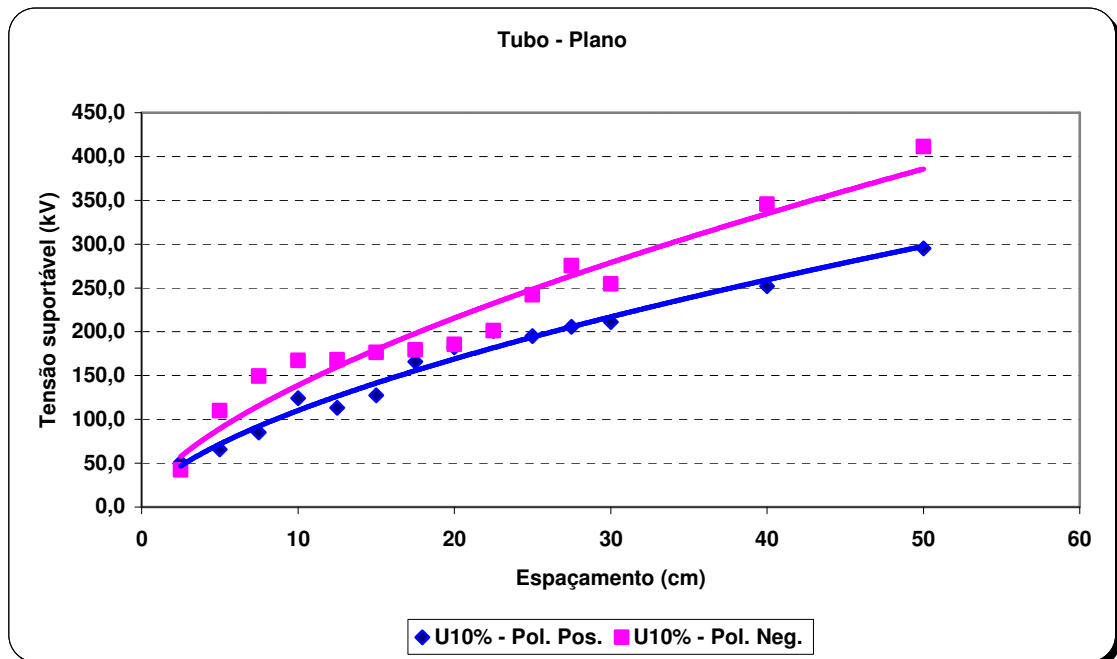


Figura D.10 - Configuração tubo-plano, tensão de impulso atmosférico

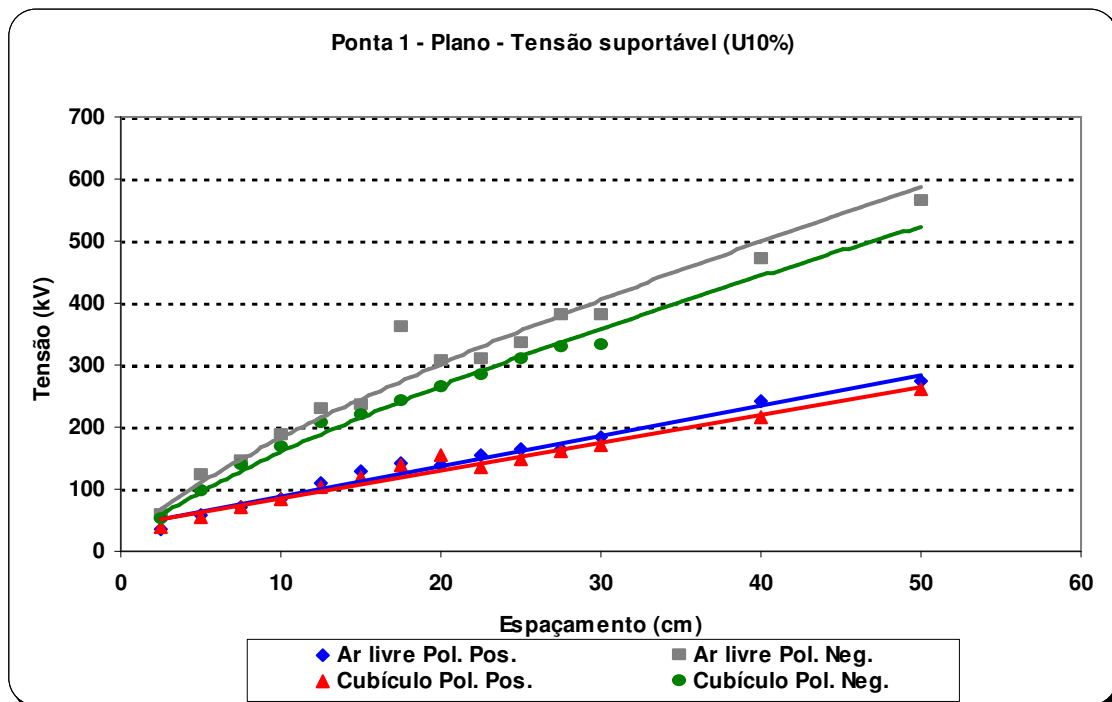


Figura D.11 - Configuração haste-plano com a ponta 1, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

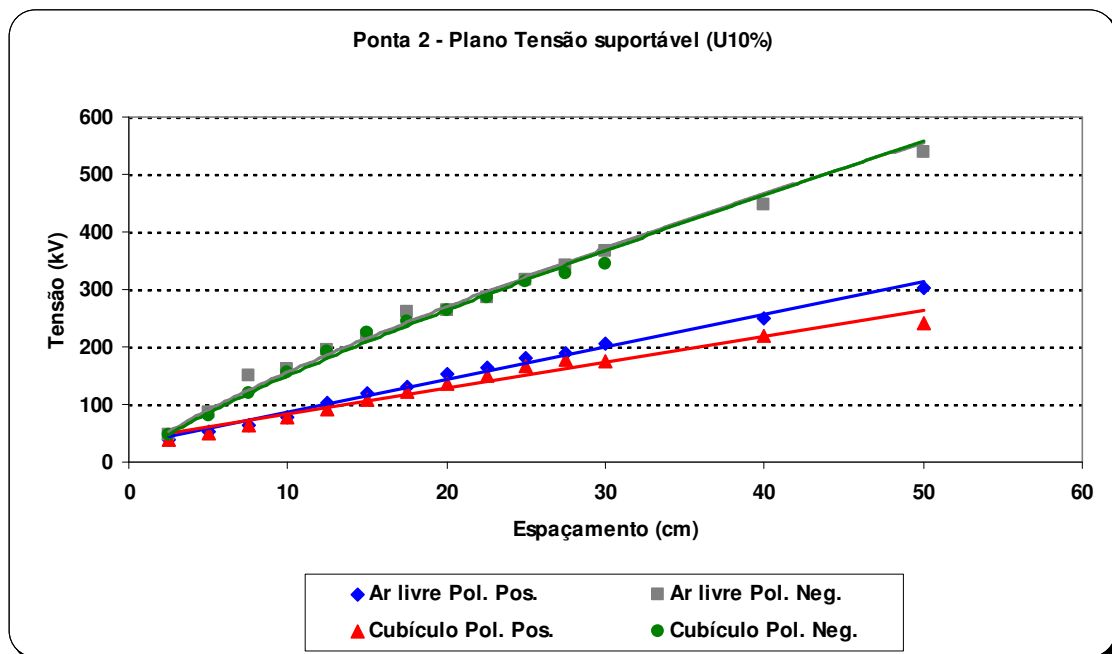


Figura D.12 - Configuração haste-plano com a ponta 2, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

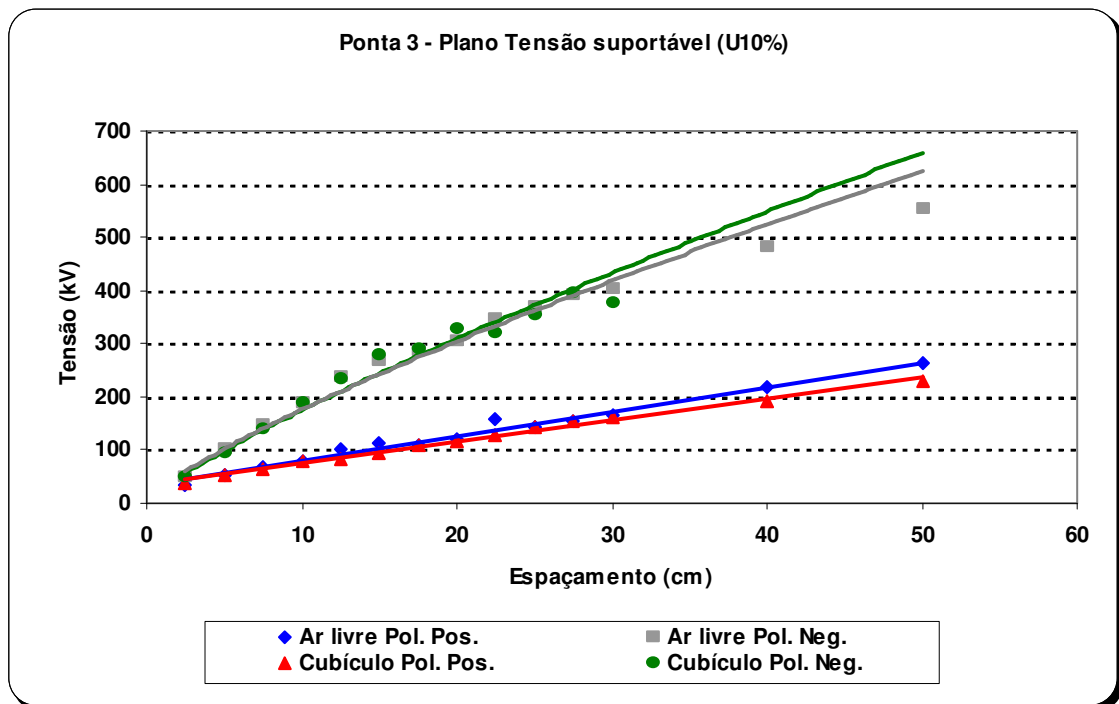


Figura D.13 Configuração haste-plano com a ponta 3, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

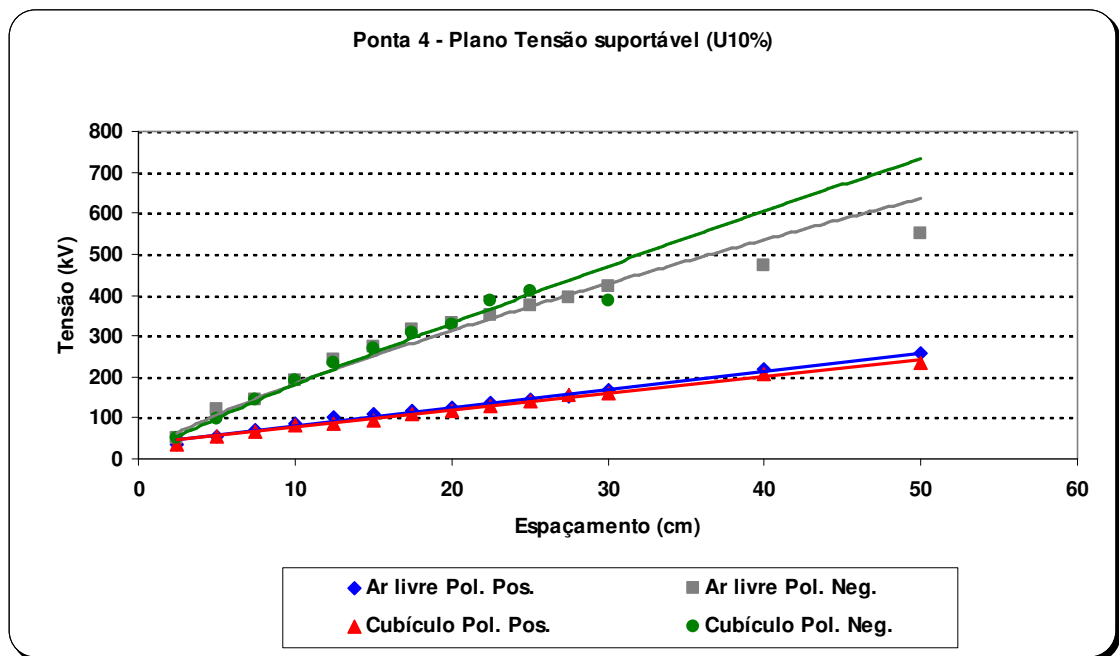


Figura D.14 - Configuração haste-plano com a ponta 4, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

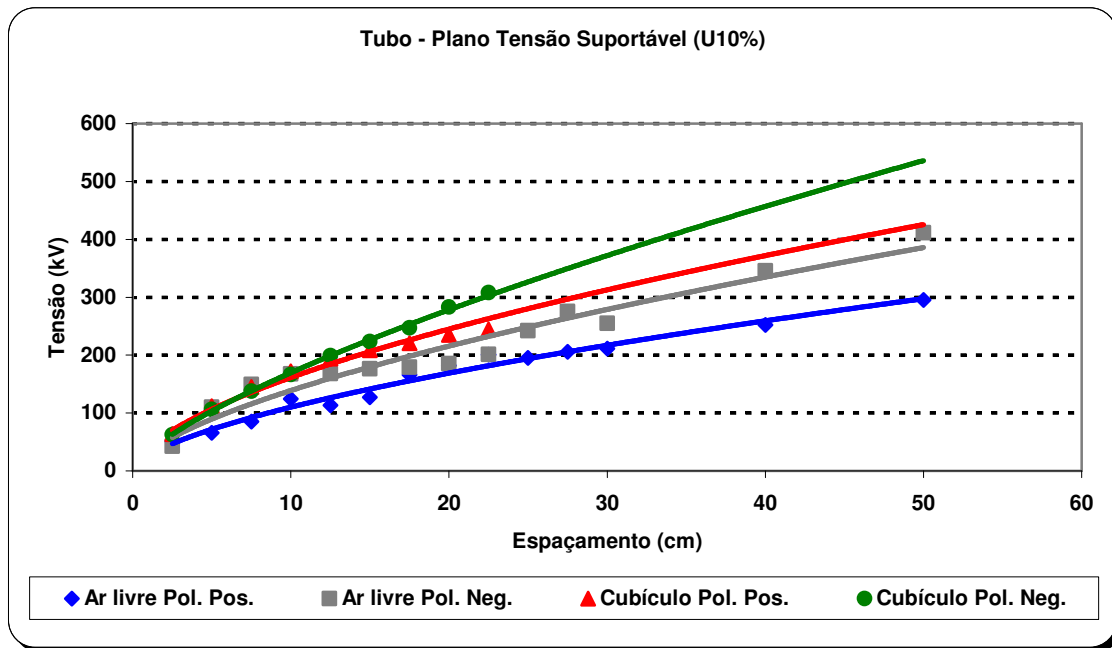


Figura D.15 - Configuração tubo-plano, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

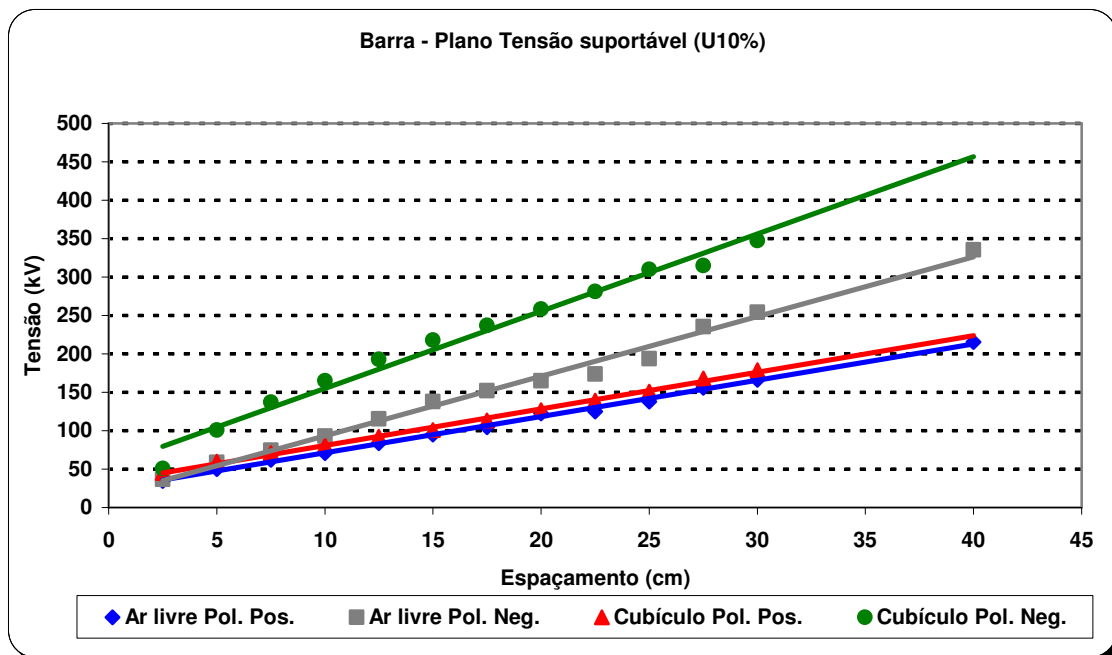


Figura D.16 - Configuração barra-plano, tensão de IA ao ar livre e dentro do cubículo

## ANEXO E

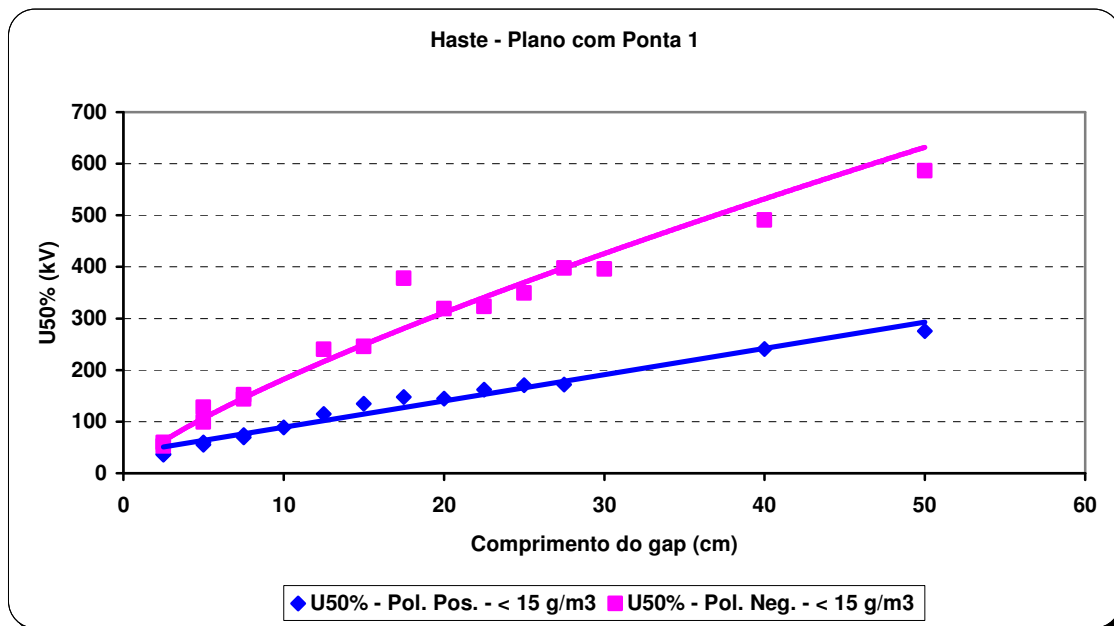


Figura E.1 - Configuração haste-plano com a ponta 1, tensão de impulso atmosférico

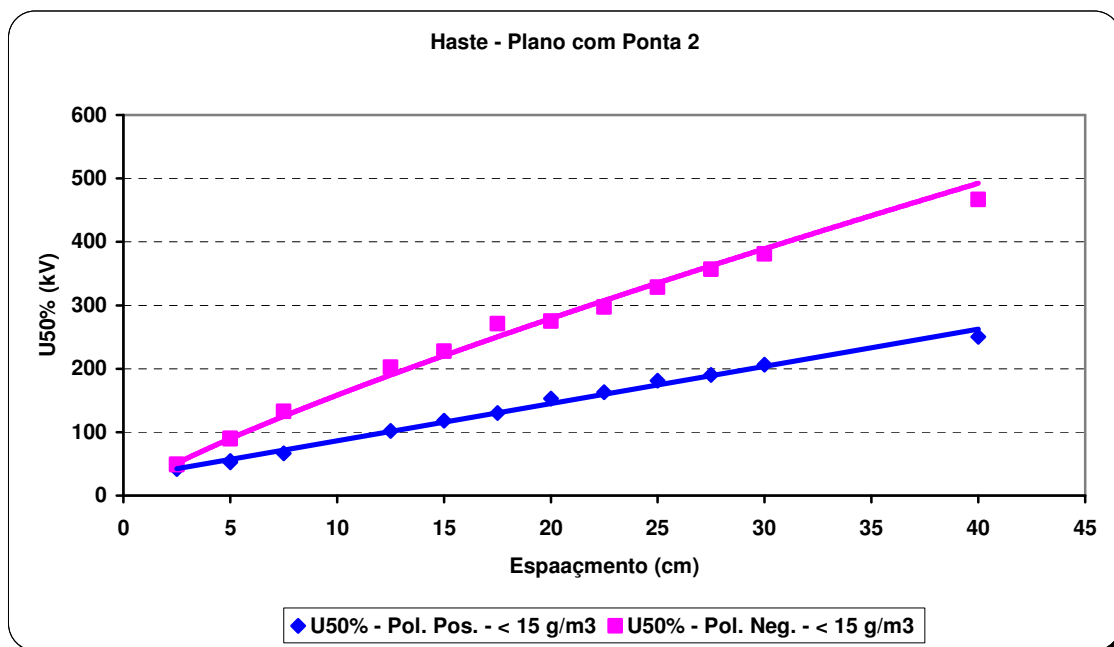


Figura E.2 - Configuração haste-plano com a ponta 2, tensão de impulso atmosférico

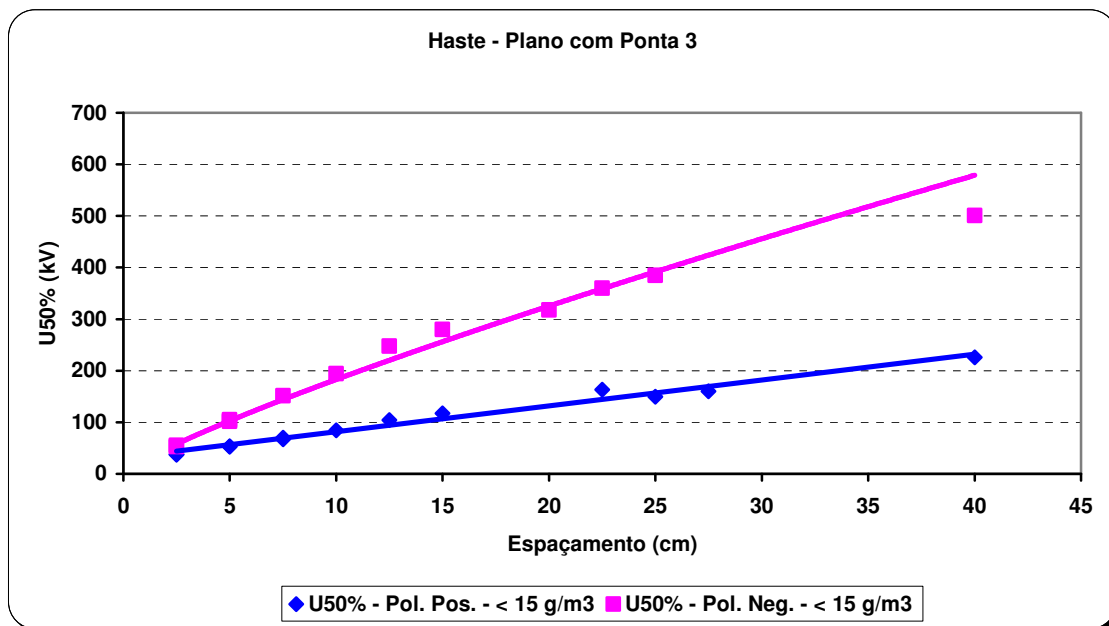


Figura E.3 - Configuração haste-plano com a ponta 3, tensão de impulso atmosférico

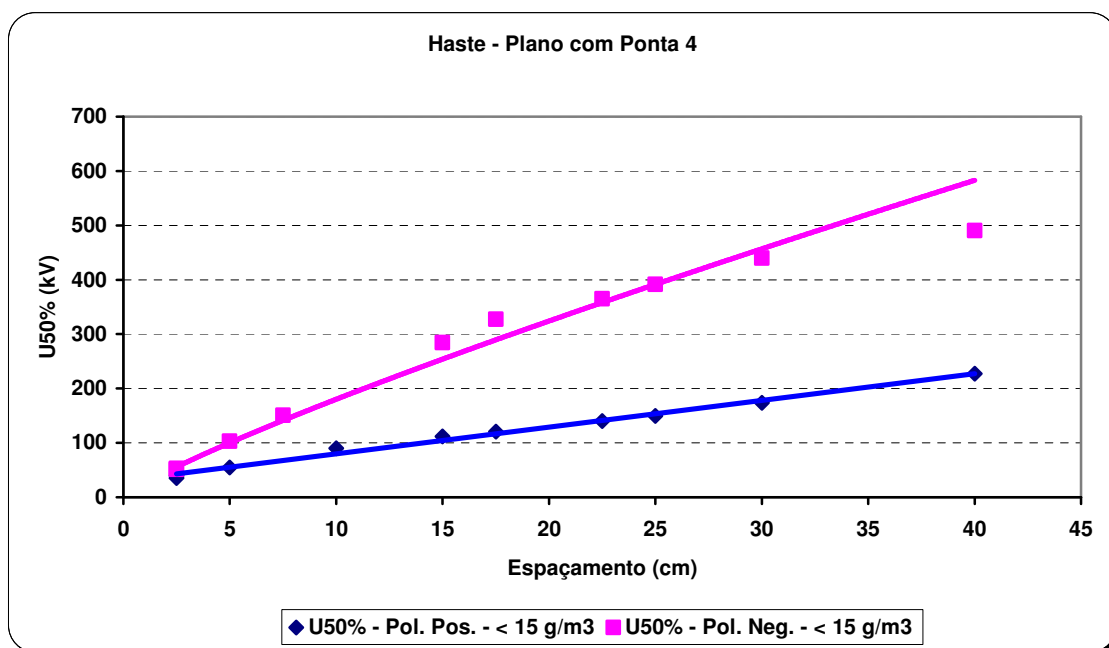


Figura E.4 - Configuração haste-plano com a ponta 4, tensão de impulso atmosférico



## ANEXO F

Neste anexo são apresentados os resultados obtidos ao ar livre com tensão alternada, figuras F.1 a F.6..

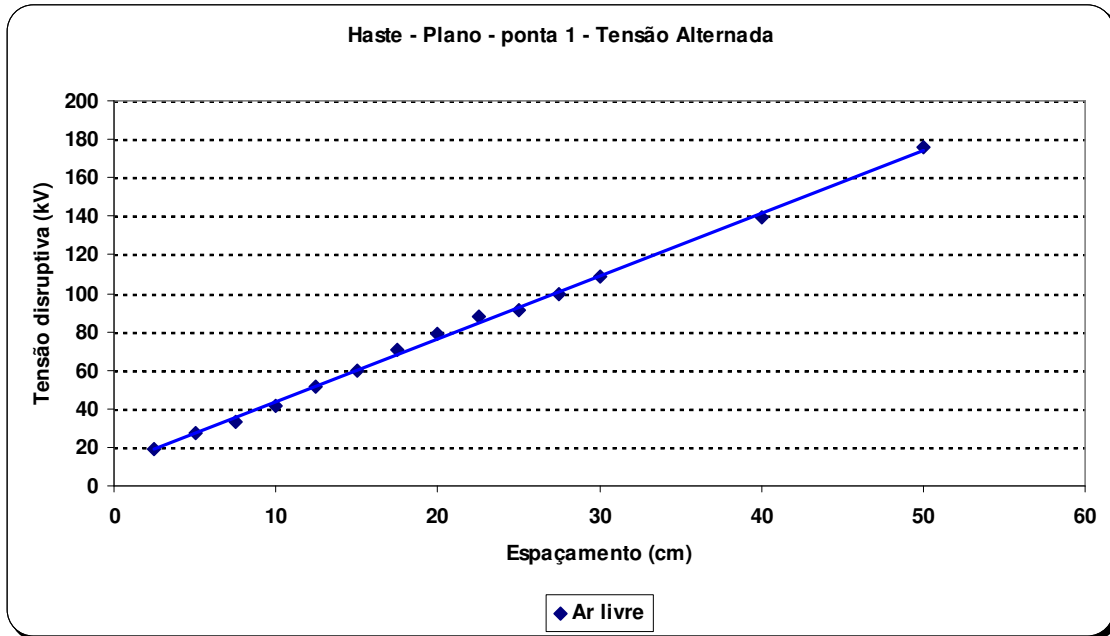


Figura F.1 - Configuração haste-plano com a ponta 1, tensão alternada

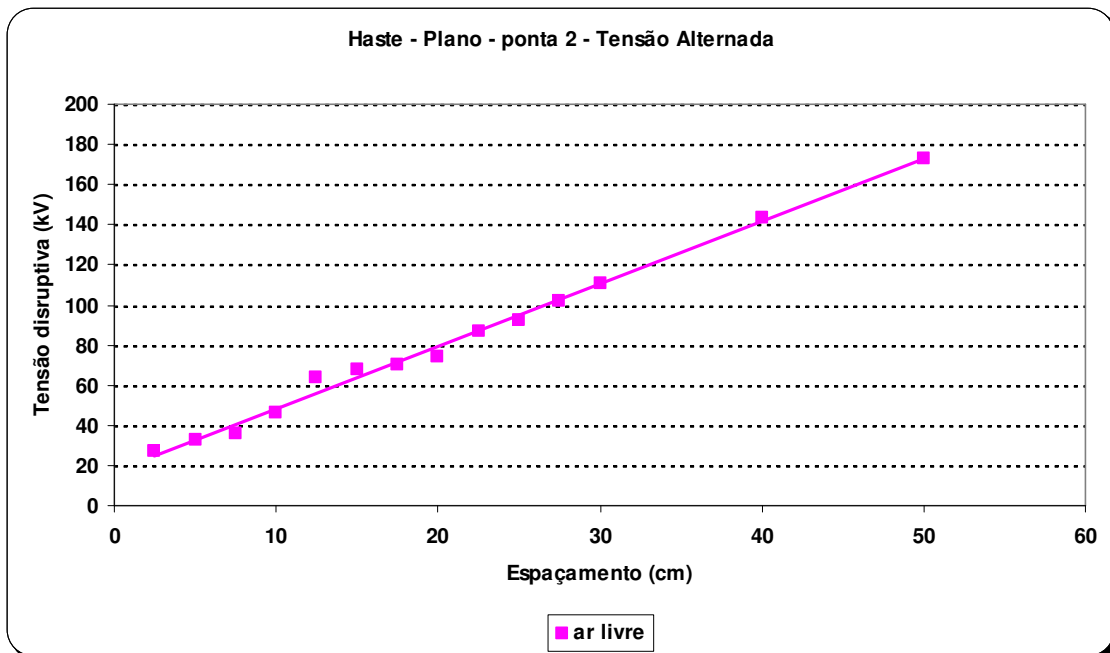


Figura F.2 - Configuração haste-plano com a ponta 2, tensão alternada

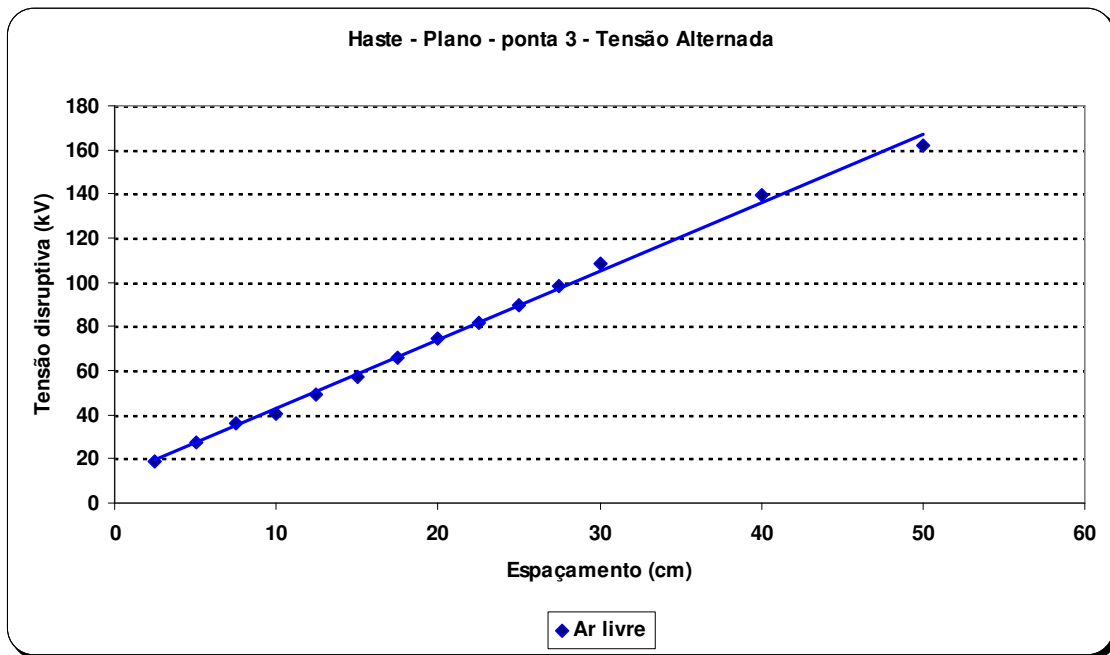


Figura F.3 - Configuração haste-plano com a ponta 3, tensão alternada

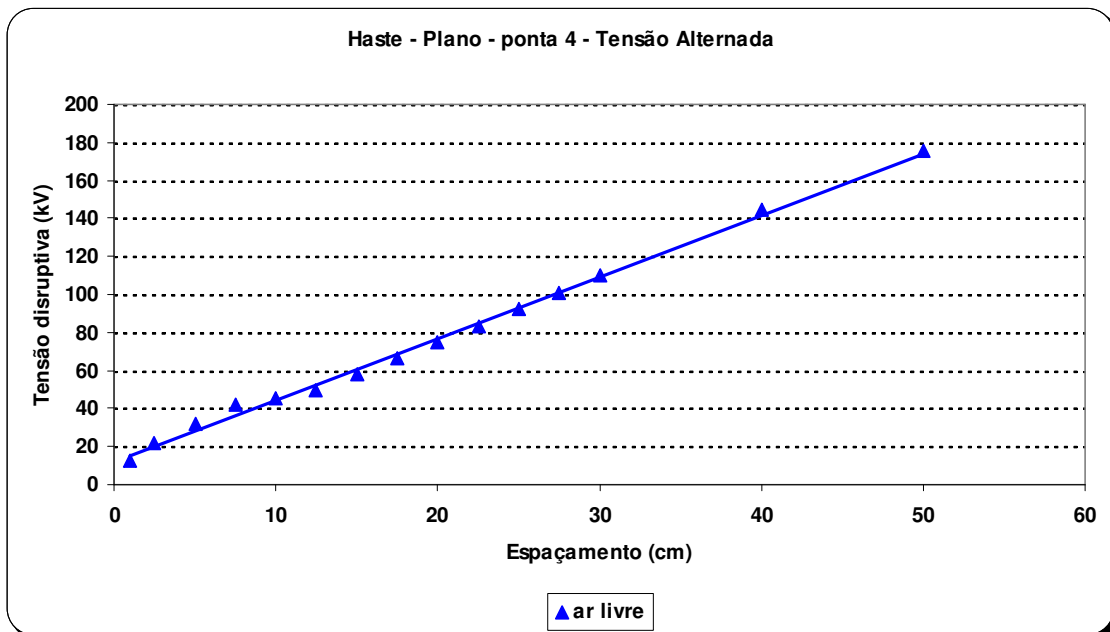


Figura F.4 - Configuração haste-plano com a ponta 4, tensão alternada

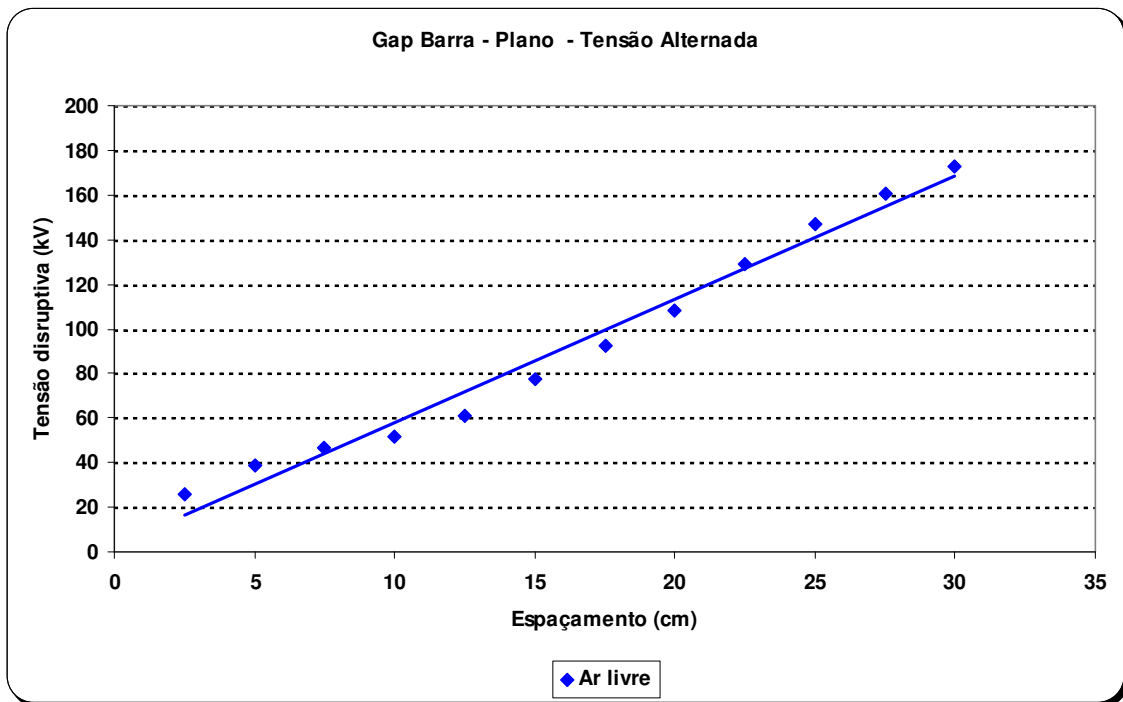


Figura F.5 - Configuração barra-plano, tensão alternada

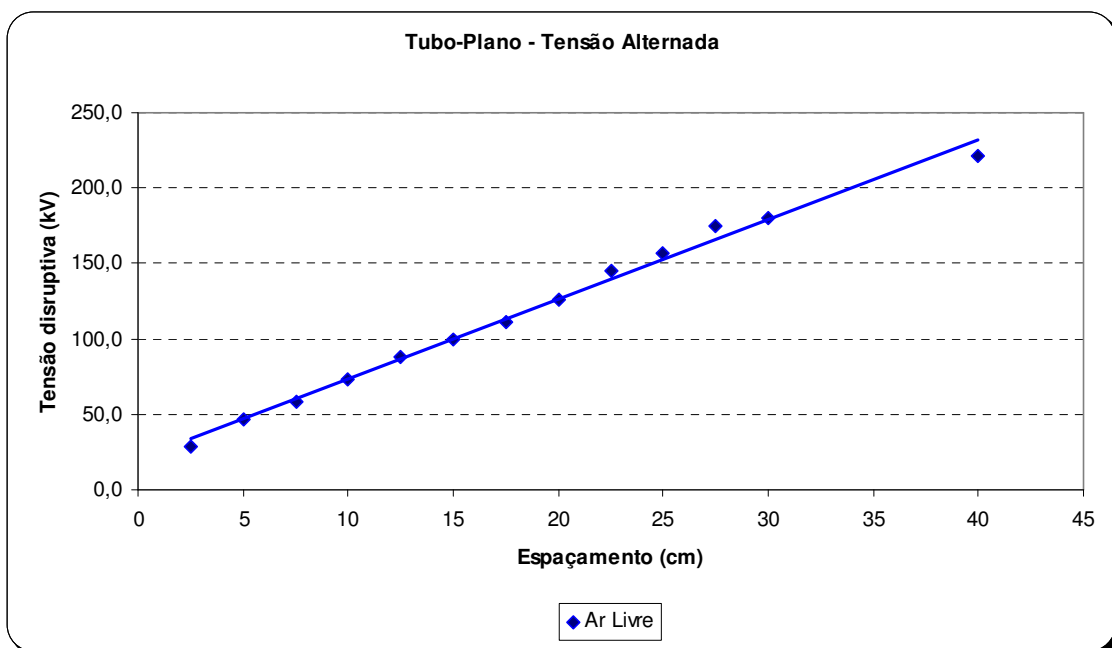
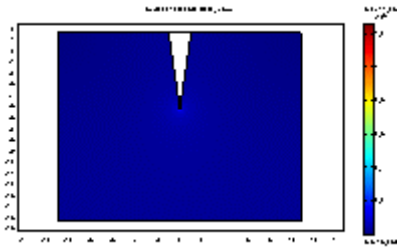


Figura F.6 - Configuração tubo-plano, tensão alternada

## ANEXO G

Maiores informações sobre as simulações estão neste anexo.

A descrição abaixo é da configuração ponta4-plano com espaçamento de 10cm ao ar livre.



Application modes and modules used in this model:

- Geom1 (2D)
  - Electrostatics (Electromagnetics Module)

### 1. Model Properties

Property	Value
----------	-------

Model name

Author

Company

Department

Reference

Saved date Feb 3, 2006 11:54:49 PM

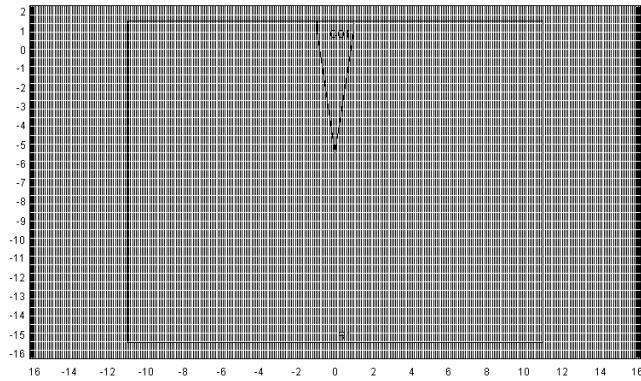
Creation date Nov 9, 2005 2:13:46 PM

FEMLAB version FEMLAB 3.1.0.157

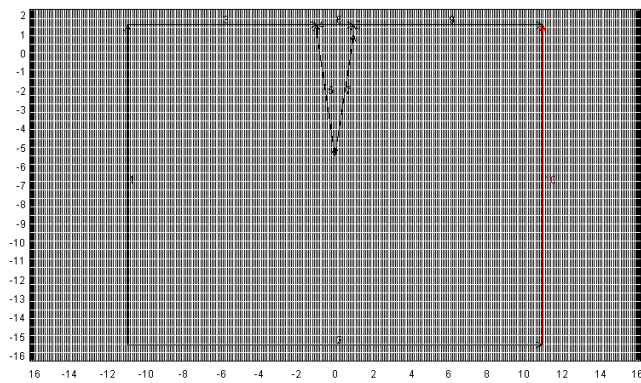
### 2. Geometry

Number of geometries: 1

## 2.1. Geom1



### 2.1.1. Boundary Mode



## 3. Geom1

Space dimensions: 2D

### 3.1. Mesh

#### 3.1.1. Extended mesh

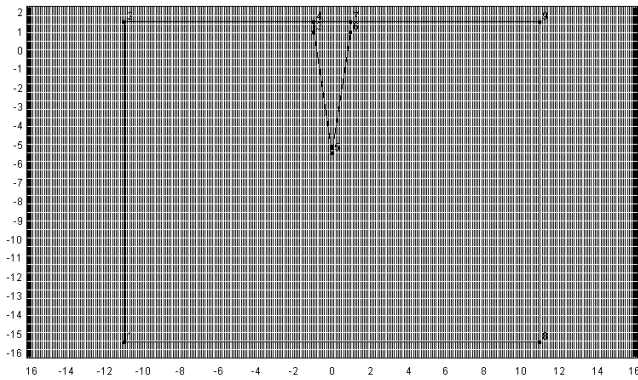
Number of degrees of freedom 210469

#### 3.1.2. Base mesh

Number of boundary elements 940

Number of elements 120458

Minimum element quality 0.3303



### 3.2. Application Mode: Electrostatics

Application mode type: Electrostatics (Electromagnetics Module)  
 Application mode name: esm

#### 3.2.1. Scalar Variables.

Name	Variable	Value	Description
epsilon0	epsilon0_esm	8.854187817e-12	Permittivity of vacuum

#### 3.2.2. Application Mode Properties

Property	Value
Default element type	Lagrange - Quadratic
Weak constraints	Off

#### 3.2.3. Variables

Dependent variables: V  
 Independent variables: x, y, z  
 Shape functions: shlag(2,'V')  
 Interior boundaries not active

#### 3.2.4. Point Settings

Point 1-9  
 Charge (Q0) 0

#### 3.2.5. Boundary Settings

Boundary	2	1, 3, 9-10	4-5, 7-8
Type	Ground	Zero charge/Symmetry	Electric potential
Electric displacement (D0)	{0;0}	{0;0}	{0;0}
Surface charge density (rhos)	0	0	0

Electric potential (V0)	0	0	<b>40000</b>
Thickness (d)	0	0	0
Group index (index)	0	0	0
Relative permittivity (epsilon_r_bnd)	1	1	1
Charge (Q0)	0	0	0
weakconstr	1	1	1
Shape functions (wcshape)	[]	[]	[]
Integration order (wcporder)	2	2	2
Initial value (wcinit)	0	0	0

### 3.2.6. Subdomain Settings

Subdomain	1
Shape functions (shape)	<b>shlag(2,'V')</b>
Integration order (gporder)	<b>4</b>
Constraint order (cporder)	<b>2</b>
Relative permittivity (epsilon_r)	1
Relative permittivity (epsrtensor)	{1,0;0,1}
epstype	iso
elconstr	epsr
Electric polarization (P)	{0;0}
Remanent displacement (Dr)	{0;0}
Space charge density (rho)	0
Exterior Maxwell stress tensor (maxwell)	{}
Subdomain initial value	1
Electric potential (V)	0

## 4. Solver Settings

Solve using a script:	off
Auto select solver on	
Solver	Stationary linear
Solution form	coefficient
Symmetric	off
Adaption	off

### 4.1. GMRES

Solver type: Linear system solver

Parameter	Value
Relative tolerance	1.0e-6
Factor in error estimate	400.0
Maximum number of iterations	10000
Number of iterations before restart	50

#### 4.1.1. Algebraic multigrid

Solver type: Preconditioner

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Number of iterations	2
Multigrid cycle	V
Maximum number of levels	6
Max DOFs at coarsest level	5000
Quality of multigrid hierarchy	3

##### 4.1.1.1. SOR

Solver type: Presmoothing

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Number of iterations	2
Relaxation factor (omega)	1.0

##### 4.1.1.2. SORU

Solver type: Postsmoothing

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Number of iterations	2
Relaxation factor (omega)	1.0

##### 4.1.1.3. UMFPAK

Solver type: Coarse solver

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Drop tolerance	0.0
Pivot threshold	0.1
Memory allocation factor	0.7

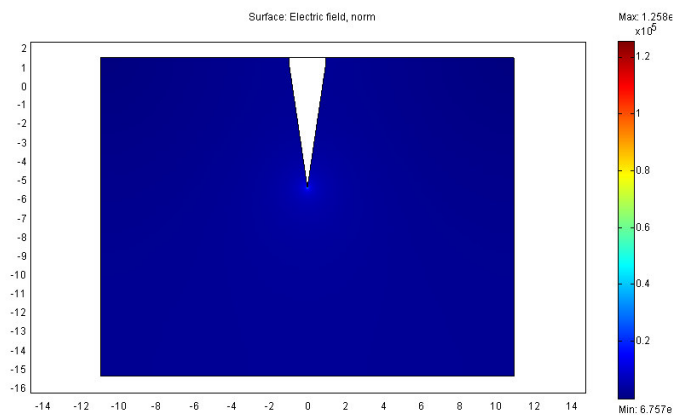
#### 4.2. Advanced

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Constraint handling method	Eliminate
Null-space function	Auto
Assembly block size	5000
Use Hermitian transpose	On
Use complex functions with real input	Off
Type of scaling	Auto
Manual scaling	



Row equilibration	On
Manual control of reassembly	Off
Load constant	On
Constraint constant	On
Mass constant	On
Jacobian constant	On
Constraint Jacobian constant	On

## 5. Postprocessing



## 6. Variables

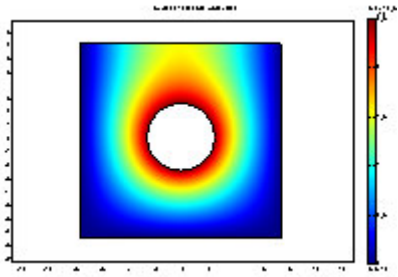
### 6.1. Boundary

Name	Description	Expression
unTx_esm	Maxwell surface stress tensor, x component	$(dnx * Dx\_esm\_up + dny * Dy\_esm\_up) * Ex\_esm\_up - 0.5 * (Ex\_esm\_up * Dx\_esm\_up + Ey\_esm\_up * Dy\_esm\_up) * dnx$
dnTx_esm	Maxwell surface stress tensor, x component	$(unx * Dx\_esm\_down + uny * Dy\_esm\_down) * Ex\_esm\_down - 0.5 * (Ex\_esm\_down * Dx\_esm\_down + Ey\_esm\_down * Dy\_esm\_down) * unx$
unTy_esm	Maxwell surface stress tensor, y component	$(dnx * Dx\_esm\_up + dny * Dy\_esm\_up) * Ey\_esm\_up - 0.5 * (Ex\_esm\_up * Dx\_esm\_up + Ey\_esm\_up * Dy\_esm\_up) * dny$
dnTy_esm	Maxwell surface stress tensor, y component	$(unx * Dx\_esm\_down + uny * Dy\_esm\_down) * Ey\_esm\_down - 0.5 * (Ex\_esm\_down * Dx\_esm\_down + Ey\_esm\_down * Dy\_esm\_down) * uny$
nD_esm	Surface charge density	$unx * (Dx\_esm\_down - Dx\_esm\_up) + uny * (Dy\_esm\_down - Dy\_esm\_up)$

## 6.2. Subdomain

Name	Description	Expression
Dx_esm	Electric displacement, x component	$\epsilon_{xx\_esm} * E_{x\_esm} + \epsilon_{xy\_esm} * E_{y\_esm}$
Dy_esm	Electric displacement, y component	$\epsilon_{yx\_esm} * E_{x\_esm} + \epsilon_{yy\_esm} * E_{y\_esm}$
epsilon_esm	Permittivity	$\epsilon_0\_esm * \epsilon_{nr\_esm}$
epsilonxx_esm	Permittivity, xx component	$\epsilon_0\_esm * \epsilon_{nrxx\_esm}$
epsilonxy_esm	Permittivity, xy component	$\epsilon_0\_esm * \epsilon_{nrxy\_esm}$
epsilonyx_esm	Permittivity, yx component	$\epsilon_0\_esm * \epsilon_{nryx\_esm}$
epsilonyy_esm	Permittivity, yy component	$\epsilon_0\_esm * \epsilon_{nryy\_esm}$
Ex_esm	Electric field, x component	$-V_x$
Ey_esm	Electric field, y component	$-V_y$
We_esm	Electric energy density	$0.5 * (D_{x\_esm} * E_{x\_esm} + D_{y\_esm} * E_{y\_esm})$
normE_esm	Electric field, norm	$\sqrt{\text{abs}(E_{x\_esm})^2 + \text{abs}(E_{y\_esm})^2}$
normD_esm	Electric displacement, norm	$\sqrt{\text{abs}(D_{x\_esm})^2 + \text{abs}(D_{y\_esm})^2}$
normP_esm	Electric polarization, norm	$\sqrt{\text{abs}(P_{x\_esm})^2 + \text{abs}(P_{y\_esm})^2}$
normDr_esm	Remanent displacement, norm	$\sqrt{\text{abs}(D_{rx\_esm})^2 + \text{abs}(D_{ry\_esm})^2}$

A descrição a seguir é da configuração tubo-plano com espaçamento de 5cm com a presença de paredes metálicas.



Application modes and modules used in this model:

- Geom1 (2D)
  - Electrostatics (Electromagnetics Module)

## 1. Model Properties

Property	Value
----------	-------

Model name	
------------	--

Author	
--------	--

Company	
---------	--

Department	
------------	--

Reference	
-----------	--

Saved date	Feb 4, 2006 1:29:39 AM
------------	------------------------

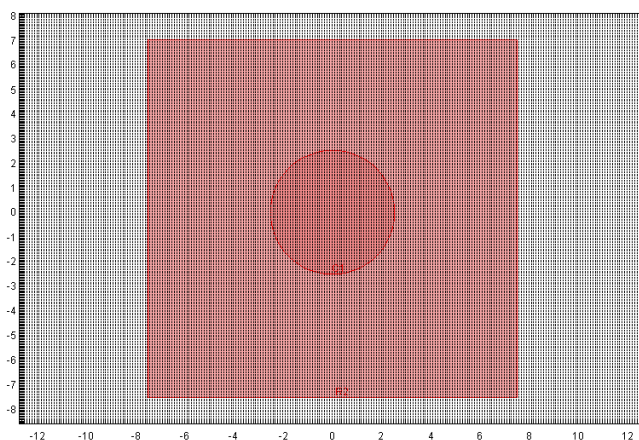
Creation date	Nov 16, 2005 11:00:53 AM
---------------	--------------------------

FEMLAB version	FEMLAB 3.1.0.157
----------------	------------------

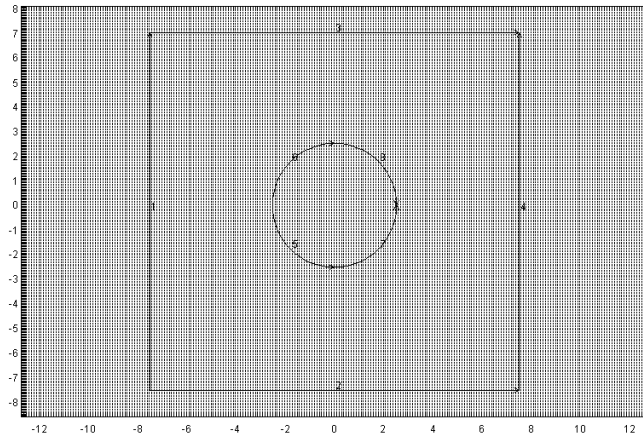
## 2. Geometry

Number of geometries: 1

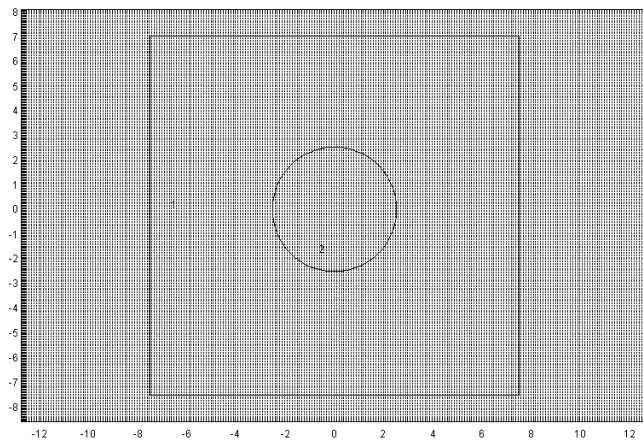
### 2.1. Geom1



### 2.1.2. Boundary Mode



### 2.1.3. Subdomain Mode



## 3. Geom1

Space dimensions: 2D

### 3.1. Mesh

#### 3.1.1. Extended mesh

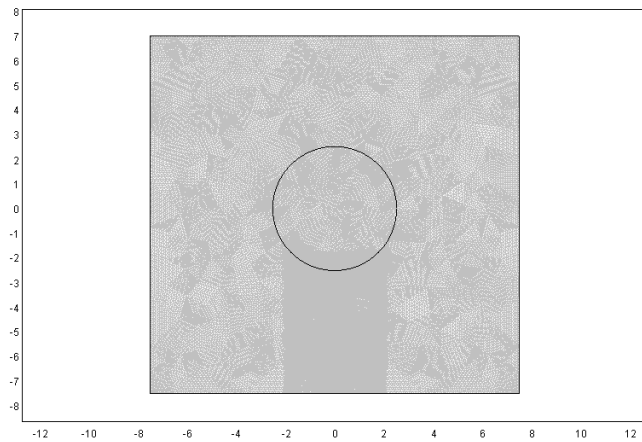
Number of degrees of freedom 194761

#### 3.1.2. Base mesh

Number of boundary elements 811

Number of elements 108592

Minimum element quality 0.6091



### 3.2. Application Mode: Electrostatics

Application mode type: Electrostatics (Electromagnetics Module)  
 Application mode name: esm

#### 3.2.1. Scalar Variables.

Name	Variable	Value	Description
epsilon0	epsilon0_esm	8.854187817e-12	Permittivity of vacuum

#### 3.2.2. Application Mode Properties

Property	Value
Default element type	Lagrange - Quadratic
Weak constraints	Off

#### 3.2.3. Variables

Dependent variables: V  
 Independent variables: x, y, z  
 Shape functions: shlag(2,'V')  
 Interior boundaries active

#### 3.2.4. Point Settings

Point	1-8
Charge (Q0)	0

#### 3.2.5. Boundary Settings

Boundary	1-2, 4	3	5-8
Type	Ground	Zero charge/Symmetry	Electric potential
Electric displacement (D0)	{0;0}	{0;0}	{0;0}
Surface charge density (rhos)	0	0	0

Electric potential (V0)	0	0	<b>25000</b>
Thickness (d)	0	0	0
Group index (index)	0	0	0
Relative permittivity (epsilon_r_bnd)	1	1	1
Charge (Q0)	0	0	0
weakconstr	1	1	1
Shape functions (wcshape)	[]	[]	[]
Integration order (wcporder)	2	2	2
Initial value (wcinit)	0	0	0

### 3.2.6. Subdomain Settings

Subdomain	1
Shape functions (shape)	shlag(2,'V')
Integration order (gporder)	4
Constraint order (cporder)	2
Relative permittivity (epsilon_r)	1
Relative permittivity (epsrtensor)	{1,0;0,1}
epstype	iso
elconstrel	epsr
Electric polarization (P)	{0;0}
Remanent displacement (Dr)	{0;0}
Space charge density (rho)	0
Exterior Maxwell stress tensor (maxwell)	{}
Subdomain initial value	1
Electric potential (V)	0

## 4. Solver Settings

Solve using a script:	off
Auto select solver on	
Solver	Stationary linear
Solution form	coefficient
Symmetric	off
Adaption	off

### 4.1. GMRES

Solver type: Linear system solver

Parameter	Value
Relative tolerance	1.0e-6
Factor in error estimate	400.0
Maximum number of iterations	10000
Number of iterations before restart	50

#### 4.1.1. Algebraic multigrid

Solver type: Preconditioner

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Number of iterations	2
Multigrid cycle	V
Maximum number of levels	6
Max DOFs at coarsest level	5000
Quality of multigrid hierarchy	3

##### 4.1.1.1. SOR

Solver type: Presmoothing

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Number of iterations	2
Relaxation factor (omega)	1.0

##### 4.1.1.2. SORU

Solver type: Postsmoothing

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Number of iterations	2
Relaxation factor (omega)	1.0

##### 4.1.1.3. UMFPAK

Solver type: Coarse solver

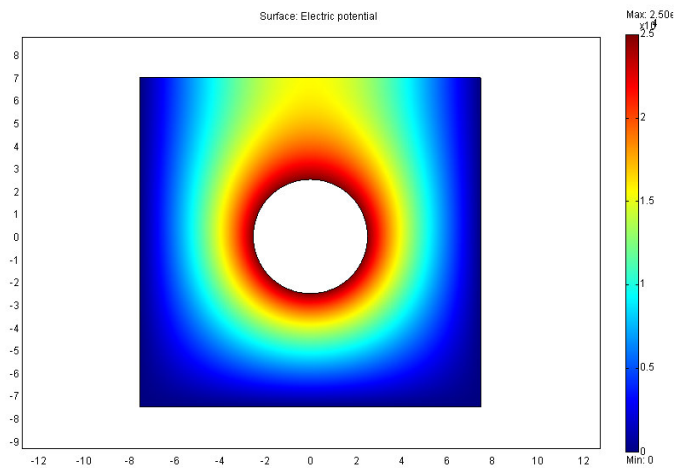
<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Drop tolerance	0.0
Pivot threshold	0.1
Memory allocation factor	0.7

#### 4.2. Advanced

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Constraint handling method	Eliminate
Null-space function	Auto
Assembly block size	5000
Use Hermitian transpose	On
Use complex functions with real input	Off
Type of scaling	Auto
Manual scaling	

Row equilibration	On
Manual control of reassembly	Off
Load constant	On
Constraint constant	On
Mass constant	On
Jacobian constant	On
Constraint Jacobian constant	On

## 5. Postprocessing



## 6. Variables

### 6.1. Boundary

Name	Description	Expression
unTx_esm	Maxwell surface stress tensor, x component	$(dnx * Dx\_esm\_up + dny * Dy\_esm\_up) * Ex\_esm\_up - 0.5 * (Ex\_esm\_up * Dx\_esm\_up + Ey\_esm\_up * Dy\_esm\_up) * dnx$
dnTx_esm	Maxwell surface stress tensor, x component	$(unx * Dx\_esm\_down + uny * Dy\_esm\_down) * Ex\_esm\_down - 0.5 * (Ex\_esm\_down * Dx\_esm\_down + Ey\_esm\_down * Dy\_esm\_down) * unx$
unTy_esm	Maxwell surface stress tensor, y component	$(dnx * Dx\_esm\_up + dny * Dy\_esm\_up) * Ey\_esm\_up - 0.5 * (Ex\_esm\_up * Dx\_esm\_up + Ey\_esm\_up * Dy\_esm\_up) * dny$
dnTy_esm	Maxwell surface stress tensor, y component	$(unx * Dx\_esm\_down + uny * Dy\_esm\_down) * Ey\_esm\_down - 0.5 * (Ex\_esm\_down * Dx\_esm\_down + Ey\_esm\_down * Dy\_esm\_down) * uny$
nD_esm	Surface charge density	$unx * (Dx\_esm\_down - Dx\_esm\_up) + uny * (Dy\_esm\_down - Dy\_esm\_up)$

### 6.2. Subdomain

Name	Description	Expression
Dx_esm	Electric displacement, x component	$epsilon_{xx\_esm} * Ex\_esm + epsilon_{xy\_esm} * Ey\_esm$



Dy_esm	Electric displacement, y component	$\epsilon_{yx\_esm} * E_{x\_esm} + \epsilon_{yy\_esm} * E_{y\_esm}$
epsilon_esm	Permittivity	$\epsilon_{0\_esm} * \epsilon_{nr\_esm}$
epsilonxx_esm	Permittivity, xx component	$\epsilon_{0\_esm} * \epsilon_{nrxx\_esm}$
epsilonxy_esm	Permittivity, xy component	$\epsilon_{0\_esm} * \epsilon_{nrxy\_esm}$
epsilonyx_esm	Permittivity, yx component	$\epsilon_{0\_esm} * \epsilon_{nryx\_esm}$
epsilonyy_esm	Permittivity, yy component	$\epsilon_{0\_esm} * \epsilon_{nryy\_esm}$
Ex_esm	Electric field, x component	-Vx
Ey_esm	Electric field, y component	-Vy
We_esm	Electric energy density	$0.5 * (D_{x\_esm} * E_{x\_esm} + D_{y\_esm} * E_{y\_esm})$
normE_esm	Electric field, norm	$\sqrt{\text{abs}(E_{x\_esm})^2 + \text{abs}(E_{y\_esm})^2}$
normD_esm	Electric displacement, norm	$\sqrt{\text{abs}(D_{x\_esm})^2 + \text{abs}(D_{y\_esm})^2}$
normP_esm	Electric polarization, norm	$\sqrt{\text{abs}(P_{x\_esm})^2 + \text{abs}(P_{y\_esm})^2}$
normDr_esm	Remanent displacement, norm	$\sqrt{\text{abs}(D_{rx\_esm})^2 + \text{abs}(D_{ry\_esm})^2}$

## BIBLIOGRAFIA

- [1] BARSCH, J.A., SEBO, S.A., KOLCIO, N., "Power frequency AC sparkover voltage measurements of small air gaps", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.14, n. 3, pp. 1096-1101, 1999.
- [2] BOUBAKEUR, A., MOKHNACHE, L., BOUKHTACHE, S., FELIACHI, A., "Theoretical Investigation on Barrier Effect on Point-Plane Air Gap Breakdown Voltage Based on Streamers Criterion", *IEE Proceedings. Science, Measurement and Technology*, v. 151, n. 3, pp. 167-174, 2004.
- [3] BEROUAL, A., BOUBAKEUR, A., "Influence of Barriers on the Lightning and Switching Impulse Strength of Mean Air Gaps in Point-Plane Arrangements", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 26, n.6, pp. 1130 -1139, 1991.
- [4] GURUMURTHY, G. R., "Corona Between Point Plane Electrodes in Air at Atmospheric Pressure", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 305-308, 2003.
- [5] ALLEN, N. L., BOUTLENDJ, M., LIGHTFOOT, H. A., "Dielectric Breakdown in Nonuniform Field Air Gaps", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v.28, n.2, pp. 183 - 191, Abr. 1993.
- [6] HIZIROGLU, H.R., SEBO, S.A., "Calculation of Breakdown Voltages of Short Air Gaps", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, v. 1, pp 435-438, 2000.
- [7] MAGLARAS, A., MAGLARAS, L., "Modeling and Analysis of Electric Field Distribution in Air Gaps, Stressed by Breakdown Voltages", *International Conference WSEAS MMACTEE*, 2004.
- [8] PETIT, A., "Dielectric Strength of Air Gaps Below 2m", *10<sup>TH</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, pp. 165-168, 1997.
- [9] ABNT, "NBR 6936 - Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta-Tensão", Abr. 1992.
- [10] THELIO, M., "Técnicas de Medição em Ensaio de Alta Tensão", CEPEL, Set. 2004.
- [11] IEC, "60060-1 - HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES - PART 1: GENERAL DEFINITIONS AND TEST REQUIREMENTS", 1989.
- [12] KRAUS, J. D., CARVER, K. R., *Eletromagnetismo*, 2 ed, RJ, Editora Guanabara, 1986.
- [13] KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., *High - Voltage Engineering*, Pergamon Press, 1984.
- [14] RAZEVIK, D.V, *High Voltage Engineering*, Russia, Khanna Publishers, 1985.

- [15] MEEK, J.M., CRAGGS, J.D., *Electrical breakdown of Gases*, Clarendon Press 1953.
- [16] HUEBNER, K. H., *Finite Element Method for Engineers*, New York, John Wiley & Sons, 1974.
- [17] DHALI, S. K., WILLIAMS, P. F., "Two-Dimensional Studies Of Streamer In Gases", *J. Appl. Phys.*, v. 62, pp. 4696 - 4707, 1997.
- [18] ABNT, "NBR 6939 - COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – PROCEDIMENTO", 2000.
- [19] IEC, "60071-2 – INSULATION CO-ORDINATION", 1996.
- [20] SCHNEIDER, K. H., WECK, K. H., "PARAMETERS INFLUENCING THE GAP FACTOR", *CIGRÉ SC No. 33*, Krakow, Sep. 1973.
- [21] ABNT, "NBR 6979 - CONJUNTO DE MANOBRA E CONTROLE EM INVÓLUCRO METÁLICO PARA TENSÕES ACIMA DE 1KV ATÉ 36,2KV – ESPECIFICAÇÃO", Jul. 1998.
- [22] IEC, "60060-2 - HIGH VOLTAGE TEST TECHNIQUES - PART 2: MEASURING SYSTEMS", 1994 .
- [23] IEEE, "Standard Techniques for High Voltage Testing", 1995.