

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO RAFAEL FERREIRA LOPES

ESTUDO DA CRITICIDADE DE CAVIDADES INTERNAS A ISOLADORES  
POLIMÉRICOS

RECIFE

2018

BRUNO RAFAEL FERREIRA LOPES

ESTUDO DA CRITICIDADE DE CAVIDADES INTERNAS A ISOLADORES  
POLIMÉRICOS

Dissertação submetida ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Energia  
Linha de pesquisa: Transmissão e Distribuição de Energia

Orientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.

RECIFE

2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

L864e      Lopes, Bruno Rafael Ferreira.  
              Estudo da criticidade de cavidades internas a isoladores poliméricos / Bruno  
              Rafael Ferreira Lopes. - 2018.  
              102 folhas, il.; tab., abr., sigl. e simb.  
  
              Orientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.  
              Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa  
de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2018.  
              Inclui Referências.  
  
              1. Engenharia Elétrica. 2. Descargas parciais. 3. Isoladores poliméricos. 4. Método  
dos elementos finitos. 5. Campo elétrico. I. Bezerra, José Maurício de Barros  
(Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-254



# Universidade Federal de Pernambuco

## *Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

# BRUNO RAFAEL FERREIRA LOPES

TÍTULO

**“ESTUDO DA CRITICIDADE DE CAVIDADES INTERNAS  
A ISOLADORES POLIMÉRICOS”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, DEE/UFPE; RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, DEE/UFPE, e TARSO VILELA FERREIRA, DEE/UFS, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **BRUNO RAFAEL FERREIRA LOPES APROVADO**.

Recife, 28 de fevereiro de 2018.

---

**MARCELO CABRAL CAVALCANTI**  
Coordenador do PPGEE

---

**JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA**  
Orientador e Membro Titular Interno

---

**TARSO VILELA FERREIRA**  
Membro Titular Externo

---

**RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE  
AQUINO**  
Membro Titular Interno

*Dedico este trabalho à minha família, pelo suporte e aconselhamento, à minha esposa Mirella, pelo apoio nos momentos difíceis, graças à ajuda deles tudo isso foi possível.*

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a toda minha família, meus pais, Lucimário e Délia, minha irmã Rafaela e minha esposa Mirella, pois sem eles me acompanhando durante toda minha jornada eu não conseguiria chegar até aqui. Agradeço aos meus colegas de trabalho na divisão de garantia e qualidade do material (DEQM) e no departamento de engenharia de subestações (DETS) na Chesf por todo o apoio para continuar meus estudos e aprimorar meus conhecimentos em engenharia elétrica. Agradeço ao professor Ronaldo pela ajuda e suporte na minha primeira incursão ao mestrado acadêmico. E por fim agradeço aos colegas do GPTD por todo o apoio, especialmente aos colegas Diego e Samuel pela ajuda com as ferramentas necessárias para compor este trabalho. Ao professor José Maurício meu sincero agradecimento pela orientação e aconselhamento.

A Todos vocês, muito obrigado.

## Resumo

Para o sistema elétrico de potência, o desenvolvimento de novos materiais isolantes permite uma contínua evolução, desta forma, nos últimos anos a utilização de materiais poliméricos para a isolação elétrica se tornou cada vez mais comum. Apesar da eficácia desses materiais, devido a impurezas ou bolhas de ar durante a sua fabricação, ou mesmo devido ao mau uso no procedimento de montagem e instalação, podem surgir cavidades internas ao material isolante, que mesmo não causando sua falha imediata, podem desencadear pequenas descargas internas e reduzir a vida útil do material deteriorando lentamente o polímero, podendo finalmente acarretar no rompimento completo do dielétrico. Este trabalho se propõe a realizar um estudo do comportamento dos isoladores poliméricos através da distribuição do campo elétrico quando o mesmo possui uma cavidade interna e está submetido a vários níveis de camada de poluição. Para se calcular os efeitos da distribuição do campo elétrico em materiais isolantes com cavidades internas é utilizado o método dos elementos finitos. A utilização desse método se torna difícil quando aplicado em objetos com geometria complexa, como é o caso dos isoladores poliméricos utilizados nesta dissertação, para facilitar esta tarefa, tem sido de grande ajuda nos estudos científicos a utilização de softwares que realizam esses cálculos. Neste trabalho foi utilizado o *software* COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> e os resultados obtidos demonstram a variação do campo elétrico no interior da cavidade em função da tensão a qual o isolador está submetido, da variação da geometria da cavidade e também em função do nível de poluição que se deposita na superfície do isolador.

**Palavras-chave:** Descargas parciais. Isoladores poliméricos. Método dos elementos finitos. Campo elétrico.

## Abstract

In the electrical power system, the development of new insulation materials allows a continuous evolution, in this way, in recent years the use of polymeric materials for electrical insulation has become increasingly common. Despite the effectiveness of these materials, cavities may arise inside the material insulation due to impurities or air bubbles during their manufacture, or even due to misuse in the assembly and installation procedure, which, even if it does not cause its immediate failure, can trigger small internal discharges and reduce the life of the material by slowly deteriorating the polymer, which can eventually lead to the complete breakdown of the dielectric. This research proposes to conduct a study of the behavior of polymeric insulators through distribution of the electric field when it has an internal cavity and various layers of pollution. This work uses the finite element method to calculate the effects of the electric field distribution in insulating materials with internal cavities. The use of this method becomes difficult when applied in objects with complex geometries, as is the case of the polymeric insulators used in this dissertation. To facilitate this task, has been of great help in scientific studies the use of a software that performs these calculations. In this research the software used was COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> and the results obtained demonstrate the variation of the electric field inside the cavity as a function of the voltage to which the insulator is subjected, of the cavity's geometry variation and also in terms of the level of pollution surface of the insulator.

**Keywords:** Partial discharges. Polymeric insulators. Finite elements method. Electric field.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Composição de um isolador polimérico . . . . .	23
Figura 2 – Exemplos de isoladores poliméricos . . . . .	24
Figura 3 – Isolador de pino com cavidade interna . . . . .	25
Figura 4 – Modelo de dielétrico com uma cavidade . . . . .	26
Figura 5 – Tensões e correntes referentes às descargas parciais . . . . .	27
Figura 6 – Modelo de dielétrico com cavidade cilíndrica . . . . .	27
Figura 7 – Circuito para medição de descargas parciais . . . . .	29
Figura 8 – Processo de avalanche de elétrons . . . . .	30
Figura 9 – Eletrodo de placas paralelas preenchido por um gás . . . . .	31
Figura 10 – Variação da corrente em função da tensão . . . . .	32
Figura 11 – Variação da corrente em função do espaçamento entre eletrodos com campo elétrico e pressão constantes. . . . .	33
Figura 12 – Curva de Paschen. . . . .	36
Figura 13 – Valores experimentais e valores calculados (pontos ●) da curva de Paschen. . . . .	37
Figura 14 – Cavidade no interior do dielétrico. . . . .	38
Figura 15 – Discretização do domínio. . . . .	39
Figura 16 – Isolador polimérico de distribuição. . . . .	44
Figura 17 – Isolador polimérico de suspensão - 245kV . . . . .	45
Figura 18 – Isolador polimérico de suspensão - 550 kV. . . . .	45
Figura 19 – Interface do AutoCAD. . . . .	46
Figura 20 – Interface do software COMSOL. . . . .	46
Figura 21 – Modelo de eletrodo de placas paralelas. . . . .	47
Figura 22 – Materiais que compõem o eletrodo de placas paralelas. . . . .	48
Figura 23 – Escolha das condições de contorno (a) Eletrodo com potencial de 30 kV (b) Eletrodo com potencial zero. . . . .	49
Figura 24 – Malha de elementos finitos triangulares. . . . .	49
Figura 25 – Simulação da distribuição do campo elétrico em 2D [kV/cm]. . . . .	50
Figura 26 – Simulação da distribuição do campo elétrico em 3D [kV/cm]. . . . .	50
Figura 27 – Campo elétrico no isolador com cavidades internas [kV/cm]. . . . .	51
Figura 28 – Modelo de cavidade em formato elipsoidal. . . . .	51
Figura 29 – Frequência de ocorrência das cavidades por tamanho (a) Semi-eixo a (mm) (b) Semi-eixo b (mm). . . . .	52
Figura 30 – Modelo CAD para o isolador de 15 kV . . . . .	53
Figura 31 – Modelo CAD para o isolador de 245 kV . . . . .	53
Figura 32 – Modelo CAD para o isolador de 550 kV . . . . .	54
Figura 33 – Superfície submetida a poluição em isolador de classe 15 kV . . . . .	55

Figura 34 – Geometria para simulação no COMSOL . . . . .	57
Figura 35 – Seleção de materiais - isolador de 15 kV . . . . .	58
Figura 36 – Condições de contorno . . . . .	58
Figura 37 – Malha de elementos finitos - isolador de 15 kV . . . . .	59
Figura 38 – Distribuição de potencial e campo elétrico no COMSOL - Isolador de 15 kV . . . . .	60
Figura 39 – Modelo de isolador classe 245 kV para simulação . . . . .	60
Figura 40 – Seleção de materiais - isolador de 245 kV . . . . .	61
Figura 41 – Condições de contorno - isolador 245 kV . . . . .	62
Figura 42 – Fonte: próprio autor. . . . .	62
Figura 43 – Malha de elementos finitos - isolador de 245 kV . . . . .	63
Figura 44 – Distribuição de potencial e campo elétrico no COMSOL - Isolador de 245 kV . . . . .	64
Figura 45 – Modelo de isolador classe 550 kV para simulação . . . . .	64
Figura 46 – Condições de contorno - isolador de 550 kV . . . . .	65
Figura 47 – Malha de elementos finitos - isolador de 550 kV . . . . .	66
Figura 48 – Distribuição de potencial e campo elétrico no COMSOL - Isolador de 550 kV . . . . .	66
Figura 49 – Inclusão da cavidade no modelo simulado . . . . .	69
Figura 50 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima ao condutor. . . . .	69
Figura 51 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 9,16$ mm posicionada próxima ao condutor. . . . .	70
Figura 52 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo $a$ da cavidade posicionada próxima ao condutor - isolador de classe 15 kV. . . . .	71
Figura 53 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima ao condutor. . . . .	71
Figura 54 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima ao condutor em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV. . . . .	72
Figura 55 – Cavidade posicionada próxima ao pino aterrado . . . . .	73
Figura 56 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	73

Figura 57 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 9,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	74
Figura 58 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo $a$ da cavidade posicionada próxima à ferragem aterrada - isolador de classe 15 kV. . . . .	75
Figura 59 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	75
Figura 60 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV. . . . .	76
Figura 61 – Concentração de campo elétrico em região próxima à ferragem aterrada	76
Figura 62 – Cavidade posicionada em região de alta concentração de campo . . . .	77
Figura 63 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada. . . . .	78
Figura 64 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 9,16$ mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada. . . . .	79
Figura 65 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo $a$ da cavidade posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada - isolador de classe 15 kV. . . . .	79
Figura 66 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada. . . . .	80
Figura 67 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV. . . . .	80
Figura 68 – Cavidade no material polimérico devido a estresse mecânico. . . . .	81
Figura 69 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1 pu) - rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.	81
Figura 70 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.	82
Figura 71 – Variação do campo elétrico na rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV. . . . .	82

Figura 72 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase. . . . .	85
Figura 73 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 9,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase. . . . .	85
Figura 74 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo $a$ da cavidade posicionada próxima à ferragem da fase - isolador de classe 245 kV. . . . .	86
Figura 75 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 563,38 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase. . . . .	86
Figura 76 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase, em função da variação de tensão no isolador de classe 245 kV. . . . .	87
Figura 77 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	88
Figura 78 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 9,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	88
Figura 79 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo $a$ da cavidade posicionada próxima à ferragem aterrada - isolador de classe 245 kV. . . . .	89
Figura 80 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 563,38 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	89
Figura 81 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada, em função da variação de tensão no isolador de classe 245 kV. . . . .	90
Figura 82 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase. . . . .	91
Figura 83 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 9,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase. . . . .	91
Figura 84 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo $a$ da cavidade posicionada próxima à ferragem da fase - isolador de classe 550 kV. . . . .	92

Figura 85 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 1224,75 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase. . . . .	92
Figura 86 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase, em função da variação de tensão no isolador de classe 550 kV. . . . .	93
Figura 87 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	94
Figura 88 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo $a = 9,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	94
Figura 89 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo $a$ da cavidade posicionada próxima à ferragem aterrada - isolador de classe 550 kV. . . . .	95
Figura 90 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 1224,75 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada. . . . .	95
Figura 91 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem aterrada, em função da variação de tensão no isolador de classe 550 kV. . . . .	96

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Tensão mínima de ruptura em vários gases. . . . .	36
Tabela 2 – Parâmetros do eletrodo de placas paralelas . . . . .	48
Tabela 3 – Características dos níveis de poluição . . . . .	55
Tabela 4 – Parâmetros do isolador polimérico de 15 kV . . . . .	57
Tabela 5 – Informações da malha, isolador de 15 kV . . . . .	59
Tabela 6 – Parâmetros do isolador polimérico de 245 kV . . . . .	61
Tabela 7 – Informações da malha, isolador de 245 kV . . . . .	62
Tabela 8 – Informações da malha, isolador de 550 kV . . . . .	65
Tabela 9 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com cavidade de semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima ao condutor. . . . .	83
Tabela 10 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com cavidade de semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada. . . . .	83
Tabela 11 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada. . . . .	84
Tabela 12 – Semi-eixo $a$ da cavidade para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da cavidade posicionada próxima à ferragem da fase no isolador submetido a tensão aplicada de 408,25 kV (1 pu) . . . . .	96
Tabela 13 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com cavidade de semi-eixo $a = 2,16$ mm posicionada próxima à ferragem da fase. . . . .	97

## **Lista de abreviaturas e siglas**

MEF	Método dos Elementos Finitos
DPs	Descargas Parciais
CHESF	Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco
Eletronorte	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A

## Lista de símbolos

$E_c$	Campo elétrico em que a ionização do ar se inicia
$E_d$	Campo elétrico necessário para a disrupção do dielétrico
$C_t$	Capacitância completa do objeto sob estudo
$C_c$	Capacitância da cavidade interna
$C_b$	Capacitância do dielétrico na região em série com a cavidade
$C_k$	Capacitância do capacitor de acoplamento
$C_a$	Capacitância do restante do dielétrico
$q_a$	Carga aparente
$\sigma_v$	Condutividade volumétrica da poluição
$\rho_v$	Densidade volumétrica da carga
$d$	Espessura da cavidade
$E$	Módulo do campo elétrico
$\nabla$	Operador nãbla
$\varepsilon_0$	Permissividade do espaço livre
$\varepsilon_r$	Permissividade relativa do material isolante
$V$	potencial elétrico
$p$	Pressão do gás
$\alpha$	Primeiro coeficiente de Townsend
$\Delta V_c$	Queda de tensão no interior da cavidade durante a descarga
$\gamma$	Segundo coeficiente de Townsend
$V_c$	Tensão no interior da cavidade
$V_d$	Tensão necessária para a disrupção do dielétrico
$V_a$	Tensão no dielétrico completo

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos da Dissertação</b>	<b>20</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização Textual</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Isoladores poliméricos</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Descargas parciais em isolantes com cavidades internas</b>	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Mecanismo de Townsend e Lei de Paschen</b>	<b>29</b>
2.3.1	Ionização por colisão	30
2.3.2	Primeiro coeficiente de Townsend	31
2.3.3	Segundo coeficiente de Townsend	32
2.3.4	Lei de Paschen	35
<b>2.4</b>	<b>Mapeamento do campo elétrico em isoladores pelo método dos elementos finitos (MEF)</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Isoladores</b>	<b>44</b>
3.1.1	Isolador de pino (15 kV)	44
3.1.2	Isolador de suspensão de 245 kV	44
3.1.3	Isolador de suspensão 550 kV	45
<b>3.2</b>	<b>Softwares Utilizados</b>	<b>45</b>
3.2.1	AutoCAD	45
3.2.2	COMSOL Multiphysics	46
<b>3.3</b>	<b>Cálculo do campo elétrico utilizando o COMSOL Multiphysics</b>	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Cavidades internas ao material isolante</b>	<b>50</b>
3.4.1	Escolha da geometria da cavidade	50
3.4.2	Escolha do tamanho inicial da cavidade simulada	52
<b>3.5</b>	<b>Desenhos no AutoCAD</b>	<b>52</b>
3.5.1	Desenho isolador polimérico de 15 kV	53
3.5.2	Desenho do isolador polimérico 245 kV	53
3.5.3	Desenho do isolador polimérico 550 kV	53
<b>3.6</b>	<b>Modelagem da poluição depositada nos isoladores utilizando o COMSOL Multiphysics</b>	<b>54</b>
<b>3.7</b>	<b>Modelagem dos isoladores poliméricos utilizando o COMSOL</b>	<b>56</b>

3.7.1	Isolador polimérico de pino classe 15 kV . . . . .	56
3.7.1.1	<i>Definição dos materiais</i> . . . . .	57
3.7.1.2	<i>Condições de contorno</i> . . . . .	57
3.7.1.3	<i>Definição da Malha</i> . . . . .	59
3.7.1.4	<i>Simulações preliminares do isolador sem a presença de cavidades</i> . . . . .	59
3.7.2	Isolador polimérico de suspensão de classe 245 kV . . . . .	59
3.7.2.1	<i>Definição dos materiais</i> . . . . .	60
3.7.2.2	<i>Condições de contorno</i> . . . . .	62
3.7.2.3	<i>Definição da malha</i> . . . . .	62
3.7.2.4	<i>Simulações preliminares do isolador sem a presença de cavidades</i> . . . . .	63
3.7.3	Isolador polimérico de suspensão de classe 550 kV . . . . .	63
3.7.3.1	<i>Definição dos materiais</i> . . . . .	63
3.7.3.2	<i>Condições de contorno</i> . . . . .	63
3.7.3.3	<i>Definição da malha</i> . . . . .	65
3.7.3.4	<i>Simulações preliminares do isolador sem a presença de cavidades</i> . . . . .	65
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> . . . . .	<b>68</b>
<b>4.1</b>	<b>Isolador polimérico de pino classe 15 kV</b> . . . . .	<b>68</b>
4.1.1	Cavidade próxima a fase . . . . .	68
4.1.1.1	<i>Variação da geometria da cavidade</i> . . . . .	68
4.1.1.2	<i>Variação da tensão aplicada ao isolador</i> . . . . .	70
4.1.2	Cavidade próxima à ferragem aterrada . . . . .	72
4.1.2.1	<i>Variação da geometria da cavidade</i> . . . . .	72
4.1.2.2	<i>Variação da tensão aplicada no isolador</i> . . . . .	74
4.1.3	Cavidade em região com maior concentração de campo elétrico . . . . .	76
4.1.3.1	<i>Variação da geometria da cavidade</i> . . . . .	77
4.1.3.2	<i>Variação da tensão aplicada ao isolador</i> . . . . .	77
4.1.4	Rachadura no material polimérico . . . . .	77
4.1.5	Surgimento das DPs no isolador de pino classe 15 kV . . . . .	78
<b>4.2</b>	<b>Isolador polimérico de suspensão classe 245 kV</b> . . . . .	<b>84</b>
4.2.1	Cavidade próxima à ferragem da fase . . . . .	84
4.2.1.1	<i>Variação da geometria da cavidade</i> . . . . .	84
4.2.1.2	<i>Variação da tensão aplicada no isolador</i> . . . . .	84
4.2.2	Cavidade próxima à ferragem aterrada . . . . .	87
4.2.2.1	<i>Variação da geometria da cavidade</i> . . . . .	87
4.2.2.2	<i>Variação da tensão aplicada no isolador</i> . . . . .	88
<b>4.3</b>	<b>Isolador polimérico de suspensão classe 550 kV</b> . . . . .	<b>90</b>
4.3.1	Cavidade próxima a fase . . . . .	90
4.3.1.1	<i>Variação da geometria da cavidade</i> . . . . .	90
4.3.1.2	<i>Variação da tensão aplicada no isolador</i> . . . . .	91

4.3.2	Cavidade próxima à ferragem aterrada . . . . .	93
4.3.2.1	<i>Varição da geometria da cavidade</i> . . . . .	93
4.3.2.2	<i>Varição da tensão aplicada no isolador</i> . . . . .	93
4.3.3	Surgimento das DPs no isolador de suspensão classe 550 kV . . . . .	94
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>98</b>
<b>5.1</b>	<b>Proposta para trabalhos futuros</b> . . . . .	<b>99</b>
	<b>Referências</b> . . . . .	<b>100</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O processamento de energia elétrica pode ser simplificada em três etapas: geração, transmissão e distribuição de energia. A geração utiliza a converção de uma energia primária advinda de fontes hidráulica, eólica, solar ou térmica em energia elétrica. A transmissão é responsável pelo transporte de energia do local em que é gerada até as proximidades dos centros consumidores. Como as distâncias percorridas são muito longas, a transmissão utiliza tensões mais elevadas para transportar grandes blocos de energia sem que haja perdas excessivas nos condutores. A distribuição é responsável pela entrega dessa energia aos consumidores finais.

Ao longo dos anos, no sistema elétrico de potência, os isoladores sempre foram de extrema importância para manter a confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia. Durante muitos anos os materiais cerâmicos, como o vidro e a porcelana, eram os únicos utilizados na fabricação desses componentes, porém com a evolução da engenharia de materiais, os polímeros passaram a ser utilizados na fabricação de isoladores. Devido a praticidade, a facilidade de instalação e a eficiência na isolação, os isoladores poliméricos ganharam grande espaço no sistema elétrico de potência, principalmente na distribuição, mas já estão sendo muito utilizados também nos sistemas de transmissão, com tensões mais elevadas.

## 1.2 Motivação

Os isoladores poliméricos são fabricados com os materiais e geometria necessários para suportar elevados níveis de tensão e campo elétrico, mas para isso devem estar em perfeitas condições. Geralmente, falhas na fabricação ou algum estresse mecânico podem causar bolhas ou fissuras que podem modificar o comportamento desses isoladores, quando submetidos a estresses elétricos. Um problema comum em isoladores com cavidades internas no seu material isolante são as descargas parciais (DPs), segundo a NBR IEC 60270 a descarga parcial é uma descarga elétrica localizada que curto-circuita apenas parcialmente o isolante entre condutores e que pode ou não ocorrer nas adjacências de um condutor. Essas descargas surgem nas cavidades devido à diferença de permissividade dos materiais causando uma distorção no campo elétrico na região. Com o tempo, essas descargas geram a degradação cada vez maior do material isolante, problema que evolui silenciosamente até que ocorra a descarga completa, rompendo o dielétrico e causando prejuízos maiores ao sistema elétrico de potência.

As descargas parciais podem ocorrer na região interna do isolante, descarga parcial interna, na superfície, descarga parcial superficial ou em regiões externas de alta concentração do campo elétrico, conhecido como efeito corona.

Das três formas citadas, a descarga parcial interna é a de diagnóstico mais difícil, pois seus efeitos não são identificados visualmente, e uma vez identificados o material deve ser substituído imediatamente. A descarga parcial interna atua degradando o material isolante, aumentando a cavidade interna lentamente até que o dielétrico se rompa completamente. Apesar dos efeitos e forma de identificação em laboratório por meio de ensaios elétricos já serem bastante comuns, um estudo sobre o mecanismo de ocorrência dessas descargas parciais e a identificação das condições mais críticas se faz necessário devido a maior gama de aplicação dos materiais poliméricos que encontramos no sistema elétrico de potência na atualidade.

### 1.3 Objetivos da Dissertação

Este trabalho tem como objetivo geral modelar isoladores poliméricos com a presença de cavidades internas e calcular a distribuição de potencial e de campo elétrico em torno das cavidades para avaliar a possibilidade de surgimento de descargas parciais.

Devido à dificuldade em observar o fenômeno das descargas parciais internas em isoladores, este trabalho sugere uma modelagem a partir da utilização do método dos elementos finitos, que é um método muito utilizado para resolução de equações diferenciais aplicadas em estruturas de geometria mais complexa como os isoladores. Com esse método será possível avaliar as consequências das DPs em isoladores poliméricos, considerando fatores como a posição da cavidade no isolador, as dimensões na cavidade, o nível de tensão aplicado no isolador e até a influência que a camada de poluição no isolador tem sobre o campo elétrico no entorno da cavidade.

Para que o trabalho atingisse seu objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. revisão bibliográfica sobre o estudo das descargas parciais internas em isolantes sólidos.
2. revisão bibliográfica sobre o método de elementos finitos (MEF) e modelos utilizados para a determinação da distribuição de potencial e campo elétrico em materiais isolantes com cavidades internas.
3. aplicação de *software* com base no MEF para avaliar a distribuição de potencial, campo elétrico e possíveis descargas parciais em isoladores poliméricos, utilizando geometrias de unidades reais já analisadas em outros estudos.

4. com os resultados obtidos avaliar os casos mais críticos para isoladores poliméricos no sistema de distribuição e transmissão.

## 1.4 Organização Textual

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 - Fundamentação teórica: estudo dos isolantes poliméricos, do mecanismo de surgimento das descargas parciais, estudo de formas de representação dos isolantes com cavidades internas através de circuitos equivalentes, introdução ao mecanismo de Townsend e da lei de Paschen para o cálculo do potencial mínimo para a ruptura do dielétrico em uma cavidade. Utilização do método dos elementos finitos (MEF) para o cálculo do potencial e campo elétrico em isoladores;
- Capítulo 3 - Material e métodos: apresentação dos isoladores utilizados como modelos para as avaliações, apresentação dos softwares utilizados nas simulações, explicação do método de simulação no COMSOL. Determinação das geometrias das cavidades que serão avaliadas e forma de representação do nível de poluição sobre a superfície do isolador;
- Capítulo 4 - Resultados e análises: demonstração dos resultados da distribuição do campo elétrico e potencial nos isoladores submetidos a diferentes níveis de poluição e nas cavidades internas em diferentes posições, avaliando os possíveis efeitos nocivos sobre o isolador que tornam o surgimento de descargas parciais mais propício, assim como a geometria de cavidade interna e o nível de tensão mais crítico para o material isolante.
- Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros: conclusões dos resultados obtidos nas diversas simulações e prospecção de trabalhos futuros para aprofundar o tema estudado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Isoladores poliméricos

Os isoladores são componentes utilizados em todos os setores do sistema elétrico de potência e possuem duas funções principais: garantir o isolamento elétrico entre dois pontos com potenciais elétricos diferentes e proporcionar o suporte mecânico dos cabos condutores às estruturas. Portanto, seu comportamento tem um papel de grande relevância na operação confiável do sistema elétrico de potência (LUNA, 2006).

Em todo o mundo, uma grande quantidade de trabalhos experimentais tem sido realizada a fim de melhor caracterizar o comportamento físico dos dielétricos sólidos submetidos às mais diversas solicitações elétricas e ambientais, para o estabelecimento de modelos teóricos que melhor representem o seu desempenho (PINHEIRO, 2008).

Historicamente, os isoladores sempre foram fabricados com materiais cerâmicos (vidro ou porcelana), materiais que ainda são utilizados na fabricação desses componentes. Porém, buscando atender a demanda do setor elétrico por produtos com boas propriedades de isolamento elétrica, resistentes a fatores como a poluição, de fácil instalação e substituição, começaram os estudos com aplicação de isoladores poliméricos.

Os polímeros são formados por materiais que apresentam estruturas moleculares simples que se repetem, ligadas entre si por ligações covalentes que favorecem uma grande estabilidade físico-química, formando longas cadeias com massa molecular elevada.

A história dos isoladores poliméricos começou na década de 40 quando os materiais isolantes orgânicos começaram a ser utilizados na fabricação de isoladores de resina epoxy, esses isoladores eram aplicados apenas em locais abrigados pois ainda ocorriam problemas de trilhamento e erosão devido a influência de fatores climáticos como umidade e poluição na superfície do material isolante. Os isoladores poliméricos para uso externo começaram a ser desenvolvidos na década de 50 com a aplicação da alumina trihidratada (ATH), o que reduziu a ocorrência de erosão e trilhamento na superfície desses isoladores. Após anos de desenvolvimento, no fim da década de 60 e início da década de 70, os fabricantes introduziram comercialmente a primeira geração dos isoladores poliméricos para linhas de transmissão. (HALL, 1993).

No Brasil, os isoladores poliméricos são utilizados predominantemente no sistema de distribuição, mas, devido ao seu bom desempenho, estão sendo cada vez mais aplicados nos sistemas de transmissão, que utilizam níveis de tensão mais elevados, como 230 kV e 500 kV.

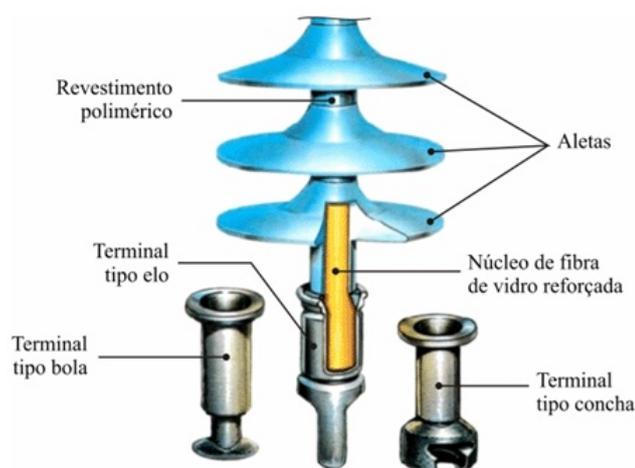
Conforme informado por BEZERRA et al., 2009 o isolador apresenta alto índice de

falha em instalações elétricas. Para minimizar esses problemas aumentou-se a aplicação dos isoladores poliméricos que já apresentam resistência mecânica e suportabilidade elétrica suficientes para substituir os isoladores convencionais cerâmicos (HACKAM, 1999), além de outras vantagens descritas a seguir:

- fundição e cura a baixas temperaturas e com reduzido tempo de fabricação;
- possibilidade de inserção de peças metálicas durante o processo de fabricação, evitando a utilização de peças coladas, que geram possíveis pontos de fragilidade;
- maior resistência a impactos (pedras e tiros), que são um problema para isoladores cerâmicos, principalmente os de vidro;
- maior versatilidade no processo de fabricação, propiciando projetos com geometrias variadas;
- boas características hidrofóbicas, ou seja, dificulta o acúmulo de água em sua superfície.

Usualmente um isolador polimérico é constituído por três partes fundamentais: o núcleo de fibra de vidro, ferragens dos terminais e superfície polimérica (aletas) (GIANELLI, 2008). Conforme ilustração apresentada na Figura 1, a qual detalha os seus diversos componentes:

Figura 1 – Composição de um isolador polimérico



Fonte: adaptado de RODURFLEX, 2004, apud FERREIRA, 2007.

- núcleo: constituído de fibra de vidro reforçada (*"Fiber Reinforced Plastic Rod"*), geralmente um composto de fibra de vidro e uma resina epóxi, serve para aumentar a rigidez mecânica e como uma matriz para a deposição de borracha de silicone durante

o processo de injeção. Muitos dos problemas ocorridos em isoladores poliméricos ocorrem no seu núcleo ou na interface entre o núcleo e o revestimento polimérico;

- terminais de conexão: geralmente constituídos de aço forjado, alumínio ou outros materiais condutores com boa resistência mecânica; são fixados através de um processo de crimpagem;
- superfície polimérica: constituída de um composto especial de borracha, podendo ser o etileno-propileno monômero (EPM), borracha de silicone (SIR), acetato de vinil-etileno (EVA) etc. Tem uma geometria projetada para aumentar a distância de escoamento e melhorar a isolação elétrica, também fornece proteção à superfície do núcleo.

Atualmente os isoladores poliméricos podem ser utilizados em diversas aplicações no sistema elétrico de potência. Eles podem também ser divididos em conformidade com a sua aplicação:

- isoladores de pino: isoladores fixados à estrutura através de um pino, geralmente utilizados na distribuição e subtransmissão, tensões até 69 kV;
- isoladores tipo pilar: são isoladores mais utilizados em subestações, construídos em peças únicas e suportam esforços mecânicos mais elevados.
- isoladores de suspensão: muito utilizados em linhas de transmissão, assim como os outros constitui-se de peça única e possui peso reduzido comparado com as cadeias de isoladores de vidro ou porcelana, por isso tem sido cada vez mais aplicado no sistema elétrico de potência.

Na Figura 2 são apresentados exemplos de isoladores poliméricos:

Figura 2 – Exemplos de isoladores poliméricos



Fonte: BALESTRO, 2017.

Apesar desses benefícios os isoladores poliméricos também possuem desvantagens, como o pouco conhecimento sobre seu processo de envelhecimento, a baixa intercambiabilidade

dade, pois são constituídos em peças únicas e não em cadeias de isoladores como são os isoladores de vidro ou cerâmicos, além da difícil detecção de falhas em seu interior.

O processo de fabricação dos isoladores poliméricos incorpora o procedimento de injeção das resinas em alta temperatura e pressão, gerando isoladores com alto grau de impenetrabilidade e com um número mínimo de interfaces, no entanto, ainda podem ocorrer falhas nesse processo, resultando em áreas internas não preenchidas por material polimérico e sim por ar. Segundo estudos realizados por (BEZERRA et al., 2010), no sistema da Eletronorte, foi demonstrado que um dos principais problemas detectados em isoladores poliméricos é a falta de aderência na interface entre o núcleo e o revestimento polimérico, ocasionando um espaço vazio preenchido por ar que pode levar a degradação do isolador.

Segundo (USHAKOV; USHAKOV, 2004), as inclusões gasosas internas aos materiais isolantes são uma das principais causas da redução da suportabilidade elétrica em isoladores poliméricos.

Um caso de cavidade interna em um isolador de pino utilizado na distribuição pode ser visto na figura 3.

Figura 3 – Isolador de pino com cavidade interna



Fonte: MENDONÇA et al., 2008.

## 2.2 Descargas parciais em isolantes com cavidades internas

Descargas parciais são pequenas descargas elétricas que não curto-circuitam completamente o dielétrico entre dois eletrodos. O fenômeno das descargas parciais engloba as descargas internas, descargas superficiais e o efeito corona (SUWANASRI et al., 2013).

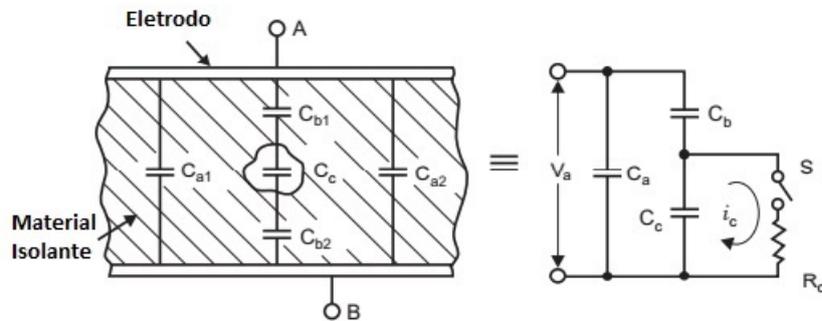
Este trabalho terá foco nas descargas parciais internas, que serão tratadas aqui apenas como descargas parciais (DPs). As descargas parciais ocorrem geralmente no interior de cavidades internas ao material isolante, essas cavidades surgem, em sua maioria, devido a defeitos na fabricação ou imposição de elevados estresses mecânicos durante sua instalação (BEZERRA, 2004).

As DPs são decorrentes do fenômeno de ionização na região do dielétrico do material isolante que apresenta alguma anormalidade (cavidades, impurezas). A ionização nessa região é provocada pelo campo elétrico a que a mesma está submetida e isso pode variar de acordo com o nível de tensão aplicada, com a geometria dos eletrodos e das cavidades presentes no dielétrico e também de suas constantes dielétricas. (NERI et al., 2005).

O comportamento das descargas parciais em cavidades internas pode ser representado por alguns modelos já conhecidos no meio acadêmico, o mais conhecido deles é o modelo das capacitâncias, desenvolvido por Germant e Philippoff em 1932 (VASSILIADIS, 2003), que se baseia na determinação das capacitâncias envolvidas no material sob estudo, dielétrico e cavidade, podendo por meio de um circuito equivalente descobrir a tensão a que a cavidade está submetida.

Esse modelo consiste no circuito ilustrado na figura 4 onde a capacitância  $C_c$  representa a capacitância da cavidade interna,  $C_b = C_{b1} // C_{b2}$ , é a capacitância do dielétrico que está na região em série com a cavidade e  $C_a = C_{a1} + C_{a2}$ , é a capacitância do restante do dielétrico. O fechamento da chave S simula a ocorrência da descarga, fazendo surgir a corrente  $i_c$ , que é limitada pelo resistor  $R_c$ .

Figura 4 – Modelo de dielétrico com uma cavidade



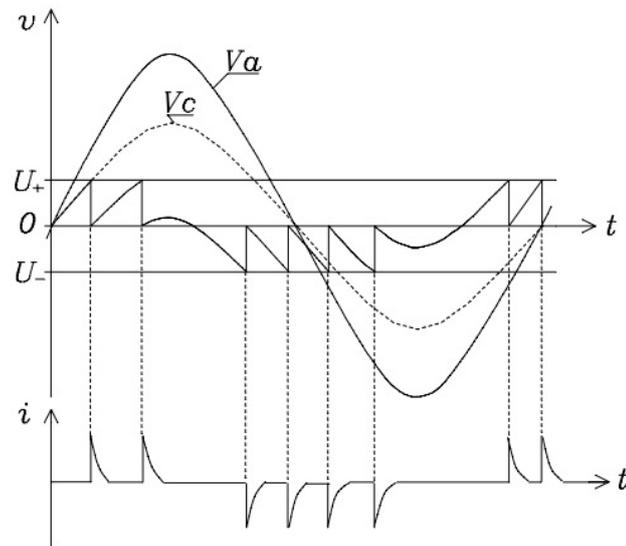
Fonte: modificado de WADHWA, 2007.

Pode ser observado que para o modelo acima a tensão aplicada na cavidade é dada por:

$$V_c = \frac{C_b}{C_b + C_c} \cdot V_a, \quad (2.1)$$

Na Figura 5 é ilustrado que, quando a tensão na cavidade  $V_c$  atinge o valor da tensão de descarga  $U_+$ , uma descarga disruptiva ocorre dentro da cavidade e a tensão interna cai bruscamente, quando a descarga é extinta a tensão volta a crescer na cavidade até atingir novamente a tensão  $U_+$  e o processo se repete, da mesma forma acontece no semiciclo negativo com  $U_-$ . Nos instantes que a tensão cai bruscamente surgem picos de corrente na cavidade e assim ocorrem as descargas parciais internas.

Figura 5 – Tensões e correntes referentes às descargas parciais

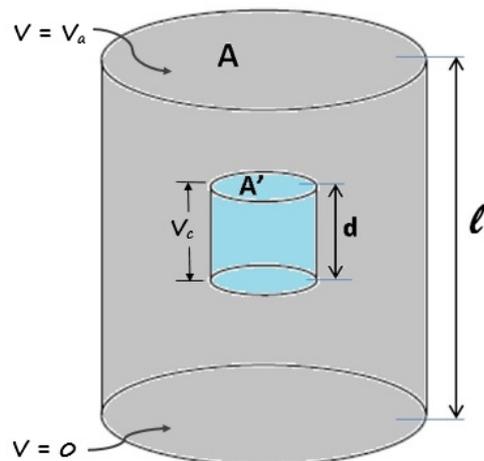


Fonte: PIAZZA, 2003.

Para calcular as capacitâncias descritas nesse modelo é preciso conhecer a geometria do dielétrico e da cavidade.

Como exemplo, na Figura 6 verifica-se um dielétrico cilíndrico de área  $A$  e espessura  $l$ , que possui em seu interior uma cavidade também em formato cilíndrico preenchida por ar com área  $A'$  e espessura  $d$ .

Figura 6 – Modelo de dielétrico com cavidade cilíndrica



Fonte: Próprio autor.

Assim, as capacitâncias equivalentes do circuito da figura 4 são calculadas conforme

as equações 2.2, 2.3 e 2.4:

$$C_c = \frac{\varepsilon_0 A'}{d}, \quad (2.2)$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A'}{(l-d)}, \quad (2.3)$$

$$C_a = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (A-A')}{l}. \quad (2.4)$$

Onde  $\varepsilon_0$  é a permissividade do espaço livre e  $\varepsilon_r$  é a permissividade do isolante sólido.

Substituindo as equações 2.2 e 2.3 em 2.1 obtém-se:

$$V_c = \frac{V_a}{1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \left( \frac{l}{d} - 1 \right)}. \quad (2.5)$$

Nota-se portanto que a tensão que irá surgir na cavidade dependerá da tensão aplicada no dielétrico completo e da espessura da cavidade.

Pode ser assumido que o campo elétrico necessário para causar uma descarga em uma cavidade preenchida por gás é dado por  $E_d$ , assim utiliza-se a equação 2.5 para encontrar a tensão nos terminais do dielétrico, no momento que ocorre uma descarga na cavidade, chamada aqui de ( $V_{ad}$ ) (KUFFEL JOHN, 2000):

$$V_{ad} = E_d \cdot d \left[ 1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \left( \frac{l}{d} - 1 \right) \right]. \quad (2.6)$$

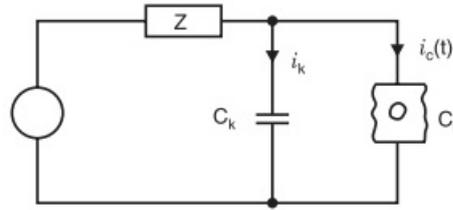
Para a detecção de descargas parciais em laboratório é utilizado o conceito de carga aparente ( $q_a$ ) no objeto sob teste, que é uma carga que causa uma variação momentânea de tensão entre seus terminais de um valor igual ao da própria descarga parcial interna (NBR IEC 60270, 2017). Geralmente a carga aparente é expressa em (pC) e pode ser calculada por:

$$q_a = C_b \cdot \Delta V_c, \quad (2.7)$$

onde  $\Delta V_c$  é a queda de tensão na cavidade durante a descarga elétrica. No entanto, na prática, essas grandezas apresentam grande dificuldade de serem medidas diretamente no laboratório, o que dificulta a detecção das descargas parciais. Para solucionar esse problema a medição de DPs utiliza o circuito equivalente apresentado na figura 7.

No circuito da figura 7  $C_t$  é a capacitância completa do objeto sob teste,  $C_k$  é um capacitor de acoplamento que geralmente é bem maior que  $C_t$  e  $Z$  é uma impedância

Figura 7 – Circuito para medição de descargas parciais



Fonte: WADHWA, 2007.

que funciona como filtro que desacopla  $C_k$  e  $C_t$  da fonte, durante o período de descarga, quando pulsos de corrente de alta frequência  $i_c(t)$  circulam entre  $C_k$  e  $C_t$ .

O circuito ideal ocorre quando  $C_k \gg C_t$ , porém isso é geralmente inviável economicamente, sendo mais prático trabalhar com um valor de  $C_k$  ligeiramente maior que  $C_t$ . Durante a descarga haverá uma queda de tensão  $\Delta V$  em  $C_t$  e haverá uma transferência de carga de  $C_k$  para  $C_t$  resultando em uma tensão comum  $\Delta V'$ , resultando:

$$\Delta V' \cdot (C_t + C_k) = C_t \Delta V + C_k \cdot 0, \quad (2.8)$$

$$\Delta V' = \frac{C_t \cdot \Delta V}{C_t + C_k}, \quad (2.9)$$

$$\Delta V' = \frac{q_a}{C_t + C_k}. \quad (2.10)$$

Durante a descarga em  $C_t$  a carga transferida de  $C_k$  para  $C_t$  é definida por:

$$q_m = C_k \cdot \Delta V', \quad (2.11)$$

a carga  $q_m$  pode ser mensurada em laboratório uma vez que os valores de  $C_k$  e a queda de tensão  $\Delta V'$  podem ser medidas. Comparando as equações 2.10 e 2.11 vem:

$$\frac{q_m}{C_k} = \frac{q_a}{C_t + C_k} \Rightarrow \frac{q_m}{q_a} = \frac{C_k}{C_t + C_k},$$

o que confirma que quanto maior  $C_k$  em relação a  $C_t$  mais próximo o valor medido de  $q_m$  fica da carga aparente no dielétrico sob o efeito da descarga parcial.

## 2.3 Mecanismo de Townsend e Lei de Paschen

Um método que descreve a física das descargas em gases é o método de avalanche de Townsend, o mesmo já teve sua validade comprovada através de experimentos de geração

de descargas no ar, considerando campos uniformes e valores do produto entre pressão do ar e distância dos eletrodos ( $pd$ ) de até 15 kPa.m. (SILVA, 2013).

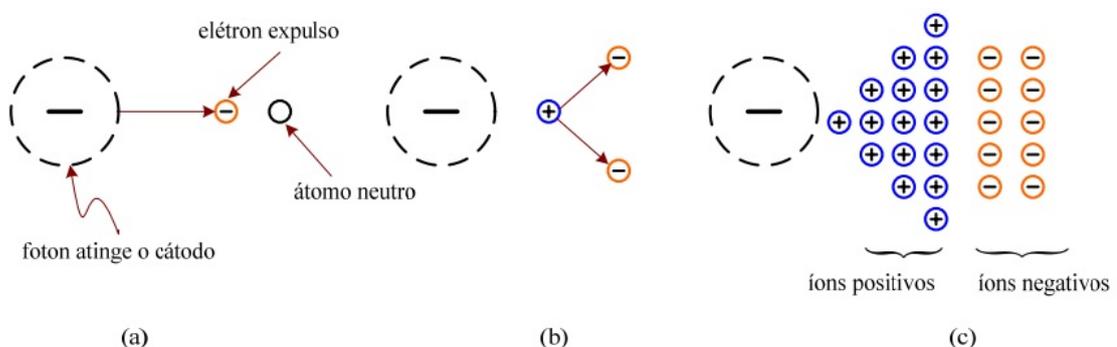
### 2.3.1 Ionização por colisão

O processo de ionização principal em uma cavidade preenchida por ar é a ionização por colisão entre um elétron livre e um átomo ou molécula neutra. Se um elétron livre está submetido a um campo elétrico, ele é acelerado e colide com átomos de nitrogênio, oxigênio e outros gases presentes.

A velocidade do elétron é diretamente proporcional a intensidade do campo elétrico. Se o campo elétrico não for intenso o suficiente, as colisões serão elásticas, ou seja, só haverá transferência de energia cinética, não ocorrendo a liberação de outro elétron na colisão.

Por outro lado se a intensidade do campo elétrico exceder um valor crítico, o elétron livre irá colidir com a molécula de ar a uma velocidade suficiente para deslocar outro elétron de sua órbita, ionizando o átomo. Nesse momento os dois elétrons livres serão acelerados pelo campo elétrico, causando mais duas colisões com moléculas de ar e assim sucessivamente, com o número de elétrons livres dobrando a cada colisão. Este processo de avalanche de elétrons é conhecido como avalanche de Townsend (NEVES, 2001, SILVA, 2013). O processo é ilustrado na Figura 8 onde pode ser verificado em (a) a etapa de fotoionização onde o primeiro elétron livre é liberado do cátodo e ganha aceleração proporcional ao campo elétrico aplicado, em (b) ocorre a ionização de uma molécula neutra devido a colisão onde é liberado outro elétron. Em (c) o processo se encontra em seu estado final com o dielétrico polarizado.

Figura 8 – Processo de avalanche de elétrons



Os íons positivos são mais pesados que os elétrons, por isso se movem mais lentamente em direção ao eletrodo negativo. Por terem uma carga positiva, esses íons atraem os elétrons livres que estão vagando na região e quando conseguem capturá-los, um quantum de energia é emitido pela molécula, irradiando uma onda eletromagnética, que no caso de moléculas de ar como o oxigênio ou nitrogênio, emite uma luz visível na cor violeta clara.

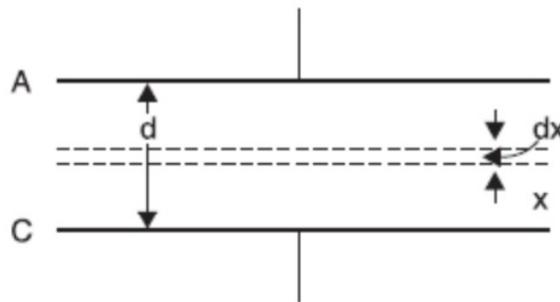
Os elétrons e íons positivos provenientes deste processo são suficientes para conduzir corrente entre os eletrodos causando um centelhamento, quando esse centelhamento ocorre diz-se que houve uma ruptura do dielétrico, como essa ruptura ocorre apenas na cavidade e não entre os eletrodos por completo diz-se que houve uma descarga parcial (CUENCA, 2005).

### 2.3.2 Primeiro coeficiente de Townsend

Por volta de 1910 Townsend desenvolveu uma explicação teórica para o fenômeno das descargas em gases (MASON, 1978, TOWNSEND, 1910).

Utilizando um eletrodo de placas paralelas ilustrado na Figura 9, Townsend verificou que com o aumento da tensão a corrente irá variar conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 9 – Eletrodo de placas paralelas preenchido por um gás

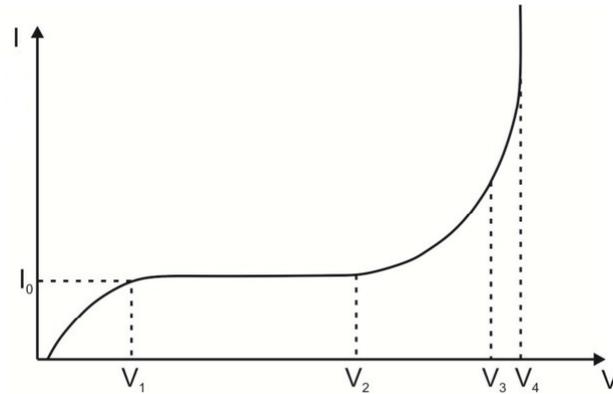


Fonte: WADHWA, 2007.

Pode ser observado que com o aumento da tensão até o valor de  $V_1$  a corrente cresce até o valor de  $I_0$  onde se mantém até que a tensão chegue ao valor de  $V_2$ . Segundo Townsend a corrente  $I_0$  corresponde à corrente produzida no cátodo devido a fotoionização.

A partir de  $V_2$  a corrente aumenta rapidamente, esse aumento foi atribuído por Townsend ao processo de ionização do gás por colisão de elétrons. Para explicar esse aumento Townsend criou a constante ( $\alpha$ ), conhecida como o primeiro coeficiente de Townsend (KUFFEL JOHN, 2000).

Figura 10 – Variação da corrente em função da tensão



Fonte: MORSHUIS, 1993.

Esse coeficiente  $\alpha$  é definido como sendo a quantidade de elétrons produzidos por um outro elétron durante seu percurso na direção do campo elétrico por unidade de comprimento. Considerando  $n$  como sendo o número de elétrons em uma distância  $x$  do cátodo na direção do campo elétrico, de acordo com a figura 9. O aumento de elétrons livres,  $dn$  a uma distância  $dx$  é definida por:

$$dn = \alpha n dx, \quad (2.12)$$

onde  $\alpha$  é o primeiro coeficiente de Townsend. Integrando a equação 2.12 ao longo da distância entre ânodo e cátodo ( $d$ ), vem:

$$n = n_0 e^{\alpha d}, \quad (2.13)$$

onde  $n_0$  é o número de elétrons iniciais gerados no cátodo. A equação 2.12 pode ser escrita em função da corrente:

$$I = I_0 e^{\alpha d}, \quad (2.14)$$

onde  $I$  é a corrente de descarga [A],  $I_0$  é a corrente inicial gerada pelo cátodo [A].

O termo  $e^{\alpha d}$  é conhecido como elétron de avalanche e representa o número de elétrons produzidos por um único elétron viajando do cátodo para o ânodo. (KUFFEL JOHN, 2000).

### 2.3.3 Segundo coeficiente de Townsend

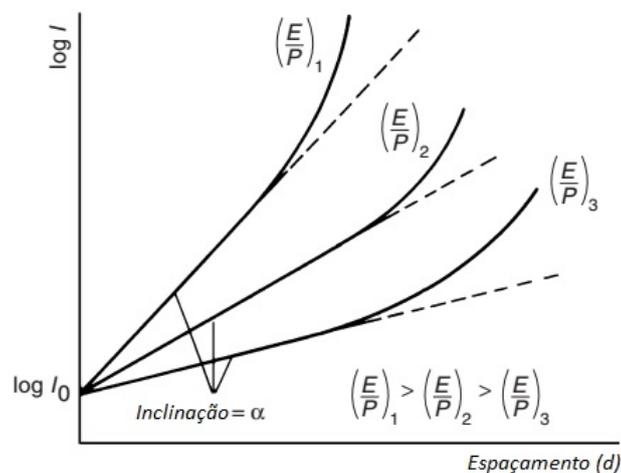
Segundo a equação 2.14, a representação de  $\ln(I)$  em função da variação de  $d$ , mantendo-se o campo elétrico e pressão constantes, deveria ser uma linha reta com

inclinação  $\alpha$  visto que:

$$\ln(I) = \ln(I_0) + (\alpha d). \quad (2.15)$$

Porém, os experimentos de Townsend indicaram, conforme ilustrado na Figura 11, uma não linearidade na curva. Para tensões mais elevadas observou-se que a corrente crescia mais rapidamente do que o calculado pela equação 2.15, demonstrando que existiam mais elétrons do que o previsto nas considerações anteriores.

Figura 11 – Variação da corrente em função do espaçamento entre eletrodos com campo elétrico e pressão constantes.



Fonte: KUFFEL, 2000.

Para explicar esse afastamento da linearidade, Townsend chegou à conclusão de que haveria um outro mecanismo que afeta o surgimento de elétrons livres, denominando esse mecanismo de emissão secundária (NEVES, 2001, KUFFEL JOHN, 2000).

A conclusão mais provável seria a emissão de elétrons pelo cátodo devido ao impacto de íons positivos e sugeriu um coeficiente de ionização adicional, conhecido como segundo coeficiente de Townsend ( $\gamma$ ).

$$\gamma = \frac{\text{número de elétrons gerados no cátodo devido aos efeitos secundários}}{\text{número de íons incidentes no cátodo}}.$$

Considerando:

$n$  = número de elétrons que chegam ao ânodo;

$n_+$  = número de elétrons liberados pelo cátodo devido ao bombardeamento de íons positivos;

$n_0$  = número de elétrons emitidos pelo cátodo devido a fotoionização.

pode ser concluído que:

$$n = (n_0 + n_+)e^{\alpha d}, \quad (2.16)$$

e

$$n_+ = \gamma[n - (n_0 + n_+)]. \quad (2.17)$$

Substituindo a equação 2.17 na equação 2.16, obtém-se:

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}, \quad (2.18)$$

reescrevendo a equação 2.18 em função da corrente de descarga vem:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}. \quad (2.19)$$

Quando a tensão no eletrodo aumenta, a corrente definida na equação 2.19 também crescerá até que ocorra uma descarga autossustentada, ou seja,  $I$  se tornará muito elevado, o que implica em dizer que o denominador da equação tenderá a zero. Portanto a descarga ocorrerá quando:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1. \quad (2.20)$$

A equação 2.20 é conhecida como critério de Townsend para ocorrência de descarga. Pode ser concluído que a ocorrência de uma descarga no eletrodo preenchido por gás será uma função da distância dos eletrodos ( $d$ ) e dos coeficientes de Townsend ( $\alpha$  e  $\gamma$ ).

O número de colisões ionizantes por unidade de comprimento é proporcional à probabilidade de colisão e portanto, proporcional a pressão  $p$  do gás, pois, com o aumento da pressão, as moléculas ficam mais próximas umas das outras, o que aumenta a probabilidade de colisão.

$$\alpha \sim p.$$

O número de colisões também depende da energia  $W_\lambda$  ganha pelo elétron entre as colisões. Quanto menor a pressão do gás maior é o caminho livre percorrido pelo elétron ( $\lambda$ ) e maior será sua energia, porém o número de colisões se reduzirá. A energia ganha pode ser expressa como:

$$W_\lambda = eE\lambda \sim eE/p,$$

assim, o primeiro coeficiente de Townsend pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\alpha = pf(eE\lambda) = pf_1(E/p) , \quad (2.21)$$

$$\frac{\alpha}{p} = f_1(E/p) . \quad (2.22)$$

O segundo coeficiente de Townsend ( $\gamma$ ) tem relação com o impacto de íons sobre o cátodo. O número de impactos dependerá da energia ganha pelos íons antes de se colidirem com o cátodo, ou seja, também são proporcionais a  $E\lambda$ , e pode ser descrito como:

$$\gamma = f_2(E/p) . \quad (2.23)$$

Os coeficientes de Townsend definem os parâmetros para ocorrência de uma descarga no gás e são funções da pressão ( $p$ ) e do campo elétrico ( $E$ ). Sendo  $E$  variável com o espaçamento dos eletrodos ( $d$ ) pode se dizer que a tensão disruptiva no gás ( $V_d$ ) pode ser descrita como uma função de  $p$  e  $d$

$$V_d = f(pd) . \quad (2.24)$$

### 2.3.4 Lei de Paschen

Em 1889, F. Paschen publicou um artigo contendo resultados experimentais obtidos com dielétricos gasosos colocados em um campo uniforme e medindo a característica tensão disruptiva  $V_d$  versus o produto da pressão do gás  $p$  pela distância dos eletrodos  $d$ , obtendo o resultado esboçado na figura 12.

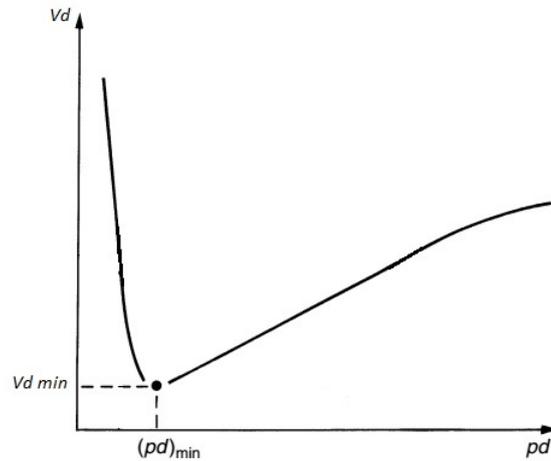
A curva  $V_d = f(pd)$  é conhecida como a curva de Paschen ou Lei de Paschen.

Pode ser observado pelo gráfico experimental que existe um valor mínimo ( $V_{d_{\min}}$ ) para um valor de  $(pd)$  onde a ionização do gás presente no eletrodo é mais eficiente, tornando mais fácil o surgimento das descargas.

Nas regiões onde  $pd < pd_{\min}$  podem ocorrer duas situações: a pressão ( $p$ ) do gás ser muito baixa (próximo ao estado de vácuo), o que torna a probabilidade de colisões dos elétrons com as moléculas muito baixa, sendo necessário um aumento no campo elétrico e consequentemente em  $V_d$  para que a descarga ocorra, ou a distância ( $d$ ) ser muito pequena, tornando o caminho livre percorrido pelo elétron ( $\lambda$ ) muito curto para que o mesmo possa ter energia suficiente para ionizar uma molécula de gás, para isso o campo elétrico também deverá aumentar.

Nas regiões onde  $pd > pd_{\min}$  também podem ocorrer duas situações: a pressão ( $p$ ) ser muito elevada o que torna o caminho percorrido pelo elétron ( $\lambda$ ) muito pequeno

Figura 12 – Curva de Paschen.



Fonte: modificado de KUFFEL, 2000.

para que o mesmo possa ter a energia necessária para ionizar outras moléculas, para que a ionização ocorra o campo elétrico deverá ser aumentado, ou a distância ( $d$ ) ser muito grande e para manter o campo elétrico a tensão deverá ser elevada.

Na Tabela 1 é apresentada a tensão mínima de ruptura do dielétrico ( $V_{d\min}$ ) para diversos tipos de gases verificados experimentalmente.

Tabela 1 – Tensão mínima de ruptura em vários gases.

Gás	$pd_{\min}(torr \cdot cm)$	$V_{d\min}(V)$
Ar	0,55	352
Nitrogênio	0,65	240
Hidrogênio	1,05	230
Oxigênio	0,7	450
Hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ )	0,26	507
Dióxido de Carbono	0,57	420
Hélio	4,0	155

Fonte: KUFFEL, 2000.

Baseado nos resultados experimentais de Paschen, a tensão disruptiva do ar, considerando um campo elétrico homogêneo é expressa como a função

$$V_d = \left(\frac{E_c}{p_c}\right) pd + \sqrt{\frac{K}{C}} \sqrt{pd}, \quad (2.25)$$

onde:

$K$  = Coeficiente de mobilidade do elétron;

$C$  = Valor constante obtido por Sohst e Schröder (KUFFEL JOHN, 2000);

$E_c$  = campo elétrico em que a ionização efetiva se inicia;

$p_c$  = pressão que combinada com o valor de  $E_c$  permite a ionização do gás.

Em seus estudos, Sohst e Schröder, definiram que para um campo homogêneo, temperatura de 20 °C e pressão de  $p_c$  de 1 bar (KUFFEL JOHN, 2000), pode-se adotar como constantes:

$$(K/C) = 45,16(kV^2/cm),$$

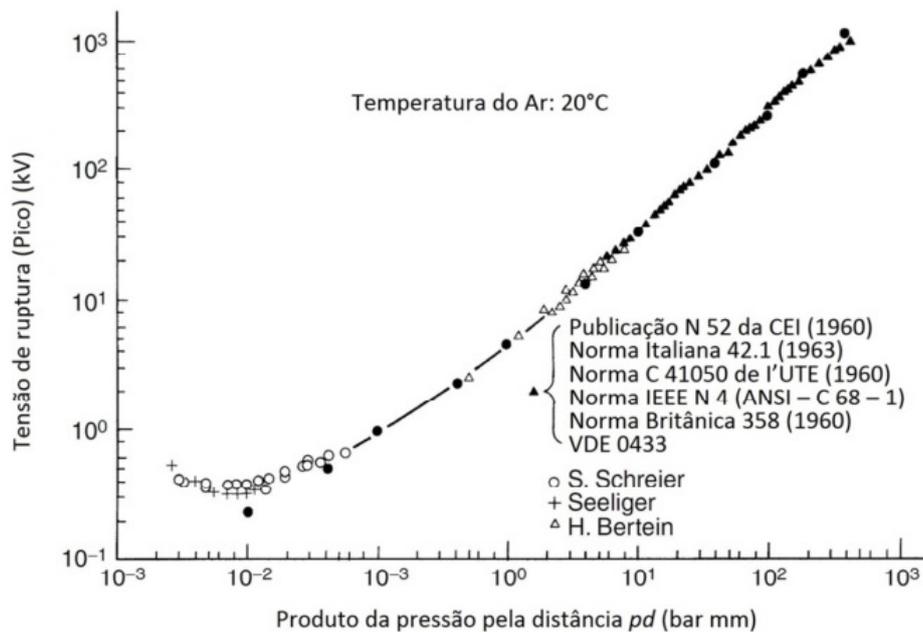
$$E_c = 24,36(kV/cm),$$

portanto a equação 2.25 se torna:

$$V_d = 6,72\sqrt{pd} + 24,36(pd) [kV]. \quad (2.26)$$

Os valores calculados (demarcados com pontos pretos) com a equação 2.26 para o ar com valores de  $pd$  variando de  $10^{-2}$  a  $5 \cdot 10^2$  ( $bar \cdot cm$ ) foram comparados com valores experimentais demonstrados na Figura 13.

Figura 13 – Valores experimentais e valores calculados (pontos ●) da curva de Paschen.

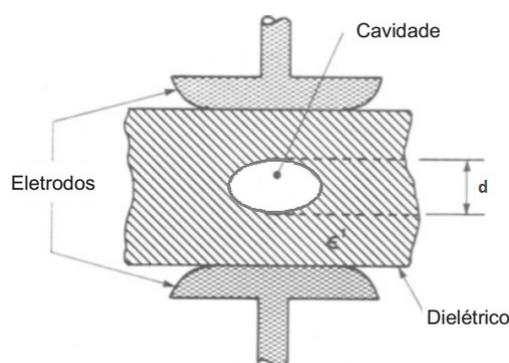


Fonte: DAKIN, 1974.

Analisando a Figura 13 conclui-se que os valores calculados condizem com os valores encontrados experimentalmente, exceto por algumas divergências encontradas para valores muito baixos de  $pd$ , porém como esses valores são pouco usuais nos casos de cavidades em materiais isolantes, a equação 2.26 tem sua aplicação validada (KUFFEL JOHN, 2000).

Os estudos realizados por Paschen e Townsend foram realizados em eletrodos de placas paralelas separados por um gás, porém, segundo (MORSHUIS, 1993), as descargas que ocorrem no interior de cavidades rodeadas por um material dielétrico, como demonstrado na Figura 14, ocorrem aproximadamente à mesma tensão das descargas ocorridas entre eletrodos metálicos igualmente espaçados. Nesse caso, para equivalência dos métodos de cálculos a espessura da cavidade no sentido do campo elétrico é considerada como o espaçamento entre os eletrodos ( $d$ ). Conforme representado na Figura 14.

Figura 14 – Cavidade no interior do dielétrico.



Fonte: modificado de BARTINIKAS; *M<sub>C</sub>MAHON*, 1979.

## 2.4 Mapeamento do campo elétrico em isoladores pelo método dos elementos finitos (MEF)

O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico utilizado para encontrar soluções aproximadas para problemas que envolvem geometrias complexas. Esse método tem como atrativo a capacidade de oferecer uma forma de solução de problemas complexos, subdividindo-os em vários problemas menores, discretos e correlacionados entre si (FERREIRA, 2007).

A proposta inicial do MEF é considerar que o domínio do problema é formado por várias sub-regiões interligadas, reduzindo o problema contínuo, que tem um número infinito de incógnitas a um problema com um número finito de incógnitas dependendo do número de nós (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

De acordo com Lewis, Nithiarasu e Seetharamu (2004) a solução de um problema utilizando MEF é um processo que utiliza os seguintes passos:

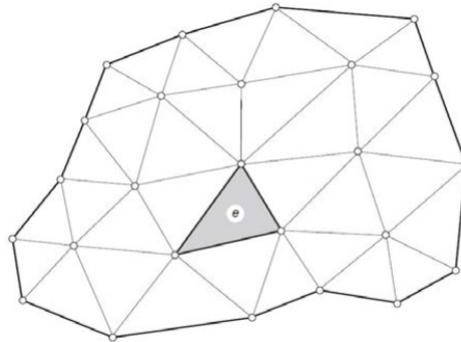
1. Discretização;
2. Seleção das funções de interpolação;
3. Formulação das matrizes;

4. Junção das equações;
5. Solução do problema conectado.

- Discretização:

O objeto a ser estudado é dividido em um número finito de elementos não sobrepostos. Os elementos podem ter formas geométricas variadas, como triângulos, quadriláteros, entre outros. Cada elemento é formado pela interligação de um certo número de pontos chamados de nós. A discretização de um objeto em elementos triangulares pode ser verificada na Figura 15.

Figura 15 – Discretização do domínio.



Fonte: ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 2000.

- Seleção das funções de interpolação:

Nesta etapa é escolhida a função que representa o fenômeno a ser estudado. Para solucionar os problemas de eletrostática são utilizadas as equações de Laplace e Poisson. Para a determinação da distribuição de potencial e do campo elétrico devem ser adotadas condições de contorno. Os dois tipos mais comuns de condições de contorno são as condições de contorno de Dirichlet e condições de contorno de Neumann, o primeiro utiliza o valor escalar do potencial enquanto o segundo utiliza a derivada do potencial como condição de contorno.

A equação de Poisson é dada por:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\varepsilon}, \quad (2.27)$$

onde  $\rho_v$  é a densidade volumétrica de carga ( $C/m^3$ ),  $\varepsilon$  é a permissividade do material ( $F/m$ ) e  $V$  é o potencial elétrico.

Se a região for livre de cargas livres, ou seja,  $\rho_v = 0$ , então a equação de Poisson se torna a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 , \quad (2.28)$$

para a definição da intensidade do campo elétrico resolve-se a seguinte equação:

$$\vec{E} = -\nabla V , \quad (2.29)$$

sendo E a intensidade do campo elétrico (V / m) e  $\nabla V$  o gradiente do potencial V.

- Formulação das matrizes:

Para cálculo do potencial, pode-se considerar a equação de um elemento triangular e demonstrado na Figura 15 como sendo:

$$V_e(x, y) = a + bx + cy , \quad (2.30)$$

considerando que  $V_{e1}$ ,  $V_{e2}$  e  $V_{e3}$  são os potenciais nos três nós do elemento triangular, utilizando a equação 2.30 tem-se a seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Pode-se então determinar dos coeficientes a, b e c através da Equação 2.31:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Reescrevendo a equação 2.30 em função dos resultados encontrados em 2.32, obtém-se a seguinte equação:

$$V_e(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Onde A é a área do elemento e, portanto o valor de 2A é definido como o módulo do determinante, ou seja:

$$2A = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$

De acordo com (SILVESTER; FERRARI, 1996, SADIKU, 2004) a equação 2.33 pode ser reescrita utilizando os termos abaixo:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] ,$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] ,$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] .$$

Portanto, ao se reescrever a equação que define o potencial em cada elemento da malha vem:

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i V_{ei} , \quad (2.34)$$

da mesma forma pode-se representar o gradiente de potencial no elemento:

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i . \quad (2.35)$$

A energia por unidade de comprimento em cada elemento  $e$  é definido pela equação:

$$W_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon |\nabla V_e|^2 dS , \quad (2.36)$$

substituindo a equação 2.35 na equação 2.36 tem-se:

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon V_{ei} \left[ \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \right] V_{ej} . \quad (2.37)$$

O termo  $(e)$  identifica que essa fórmula define a energia de cada elemento discretizado na malha. Definindo os termos entre colchetes como:

$$S_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS . \quad (2.38)$$

Pode-se escrever a equação 2.37 na forma matricial

$$[W_e] = \frac{1}{2} \varepsilon [V_e]^T [S^{(e)}] [V_e] , \quad (2.39)$$

onde:

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \text{ e } [S^{(e)}] = \begin{bmatrix} S_{11}^{(e)} & S_{12}^{(e)} & S_{13}^{(e)} \\ S_{21}^{(e)} & S_{22}^{(e)} & S_{23}^{(e)} \\ S_{31}^{(e)} & S_{32}^{(e)} & S_{33}^{(e)} \end{bmatrix}$$

A matriz  $[S^{(e)}]$  representa o acoplamento entre os nós  $i$  e  $j$  no elemento  $e$ . De acordo com os cálculos realizados, pode-se desenvolver as equações para obter, por exemplo,

$$S_{12}^{(e)} = \int \nabla \alpha_1 \cdot \nabla \alpha_2 \, dS = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] , \quad (2.40)$$

de forma análoga obtém-se os demais termos da matriz:

$$S_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2] , \quad (2.41)$$

$$S_{13}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)] , \quad (2.42)$$

$$S_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2] , \quad (2.43)$$

$$S_{23}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)] , \quad (2.44)$$

$$S_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2] . \quad (2.45)$$

Também é possível afirmar que:

$$S_{21}^{(e)} = S_{12}^{(e)} , \quad S_{31}^{(e)} = S_{13}^{(e)} \text{ e } S_{32}^{(e)} = S_{23}^{(e)} \quad (2.46)$$

- Junção das equações:

A energia associada a todos os elementos  $e$  da malha é definida como o somatório da energia de cada elemento calculado.

$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V]^T [S] [V] , \quad (2.47)$$

$N$  é o número de elementos ( $e$ ) da malha.  $[V]$  será uma matriz  $n \times 1$  e  $[S]$  uma matriz  $n \times n$ , onde  $n$  é o número de nós da malha.

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \text{ e } [S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}$$

Da mesma forma que definido anteriormente, os termos  $S_{ij}$  representam o acoplamento entre os nós  $i$  e  $j$  presente em todos os elementos que contém os nós  $i$  e  $j$ .

- Solução do problema conectado:

Para obter uma aproximação da solução da equação de Laplace, a energia do domínio, com todos os elementos conectados, deve ser mínima. (SILVESTER; FERRARI, 1996), ou seja, as derivadas parciais de  $W$  em relação a cada valor nodal do potencial deve ser zero.

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (2.48)$$

Utilizando a equação 2.47 pode-se reescrever o problema como:

$$\sum_{i=1}^n V_i S_{ik} = 0. \quad (2.49)$$

Escrevendo a equação 2.49 para todos os valores de  $k = 1, 2, \dots, n$ , obtém-se um conjunto de equações onde é possível encontrar os valores de  $V_k$  através do método iterativo.

Utilizando como condições de contorno os valores de  $V_{máx}$  e  $V_{mín}$  em nós estabelecidos, os valores dos potenciais nos demais nós podem ser calculados em diversas iterações até que os valores convirjam (SADIKU, 2004).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar o comportamento dos isoladores poliméricos na presença de cavidades internas foram utilizados três modelos diferentes de isoladores e utilizando o método dos elementos finitos tornou-se possível simular a distribuição de potencial e campo elétrico nas cavidades e em suas proximidades.

#### 3.1 Isoladores

##### 3.1.1 Isolador de pino (15 kV)

Para o desenvolvimento das simulações foi utilizado como modelo um isolador polimérico de pino da classe 15 kV padrão, utilizado em redes de distribuição e que também foi estudado por SILVA, 2013 e obteve resultados semelhantes aos encontrados em trabalhos anteriores. O isolador de pino de 15 kV tem estrutura diferente da demonstrada na Fig. 1, pois o mesmo não possui núcleo de fibra de vidro, devido ao seu tamanho e formato, não é necessário o núcleo para uma maior sustentação mecânica.

Figura 16 – Isolador polimérico de distribuição.



Fonte: próprio autor.

O isolador em questão é fixado à cruzeta da estrutura por meio de um pino que rosqueia-se à parte interna do isolador, através do orifício na base do mesmo. O condutor é apoiado no entalhe existente na parte superior do isolador e geralmente é preso por meio de um fio isolante de amarração.

##### 3.1.2 Isolador de suspensão de 245 kV

Também foi utilizado como modelo de simulação um isolador de suspensão polimérico de classe de tensão 245 kV, do fabricante Electrovidro, utilizado em linhas de

transmissão de 230 kV da Chesf. Este isolador possui aproximadamente 2.336 mm, 75 aletas e distância nominal de escoamento 6.535 mm, o mesmo pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Isolador polimérico de suspensão - 245kV



Fonte: próprio autor.

### 3.1.3 Isolador de suspensão 550 kV

Como última análise foi utilizado um modelo de isolador polimérico utilizado em linhas de transmissão de 500 kV, também do fabricante Electrovidro, estudado por LOPES, 2016. Este isolador possui comprimento de 3.820 mm, 129 aletas e distância de escoamento de aproximadamente 15.324 mm, ver Figura 18.

Figura 18 – Isolador polimérico de suspensão - 550 kV.



Fonte: Electrovidro, 2017.

## 3.2 Softwares Utilizados

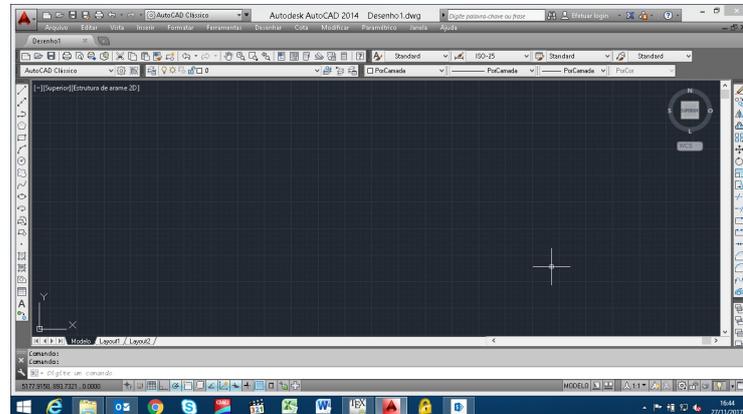
Para realização das simulações foram utilizados dois softwares principais, o AutoCAD para desenho dos modelos da forma mais fiel possível as peças reais e o COMSOL Multiphysics para a realização dos cálculos através do método de elementos finitos e tratamento dos dados obtidos.

### 3.2.1 AutoCAD

Software do gênero CAD (*Computer Aided Design*) criado e comercializado pela Autodesk, Inc. desde 1982. Com diversas aplicações nas áreas de engenharia, arquitetura

e design. Sua utilização neste trabalho consistiu em realizar os desenhos dos isoladores estudados com o dimensional mais próximo possível do real.

Figura 19 – Interface do AutoCAD.



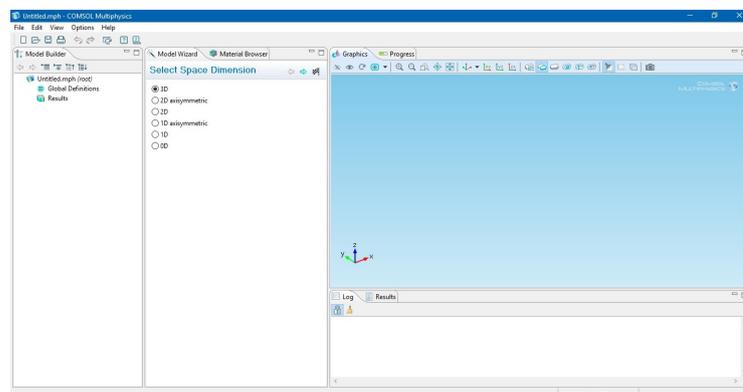
Fonte: próprio autor.

Devido a complexidade das geometrias que serão utilizadas neste trabalho, as malhas utilizadas no MEF podem apresentar milhares de elementos, o que torna a solução manual inviável. Portanto para a aplicação desse método é utilizado um software de elementos finitos, o COMSOL Multiphysics®.

### 3.2.2 COMSOL Multiphysics

O COMSOL Multiphysics é uma ferramenta para modelar e solucionar diversos problemas nas mais variadas áreas das engenharias. Anteriormente chamado de FEMLAB (*Finite Element Method Laboratory*), o que indica qual seu objetivo principal, que é ser um software poderoso para construir modelos físicos que podem ser subdivididos em milhares de elementos finitos para solucionar problemas complexos nas diversas áreas da física.

Figura 20 – Interface do software COMSOL.



Fonte: próprio autor.

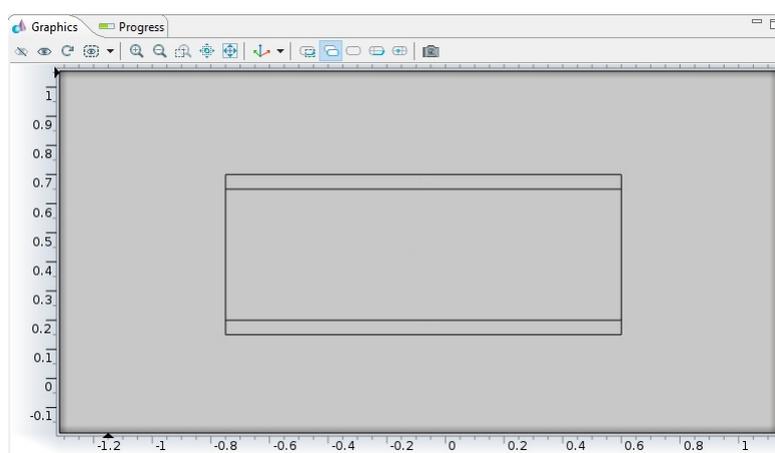
Com a utilização do COMSOL, o usuário não necessita mais ser capaz de realizar toda a análise matemática descrita na seção 2.4, pois o software executa a análise de elementos finitos juntamente com a geração adaptativa de malha e controle de erro usando uma variedade considerável de solucionadores numéricos (MULTIPHYSICS, 2012).

Com uma vasta biblioteca e possibilidades de visualização da solução do problema em várias formas, o COMSOL constitui-se de uma ferramenta importante para as análises que envolvem elementos finitos (SILVA, 2014).

### 3.3 Cálculo do campo elétrico utilizando o COMSOL Multiphysics

Utilizando um modelo de dielétrico simples, como o eletrodo de placas paralelas bidimensional apresentado na Fig. 21, a distribuição de campo elétrico ao longo dos seus eletrodos e do dielétrico pode ser simulada. Para isso o primeiro passo é construir a geometria do objeto sob estudo no *software*, desenhando no próprio COMSOL, ou importando o desenho modelado no AutoCAD.

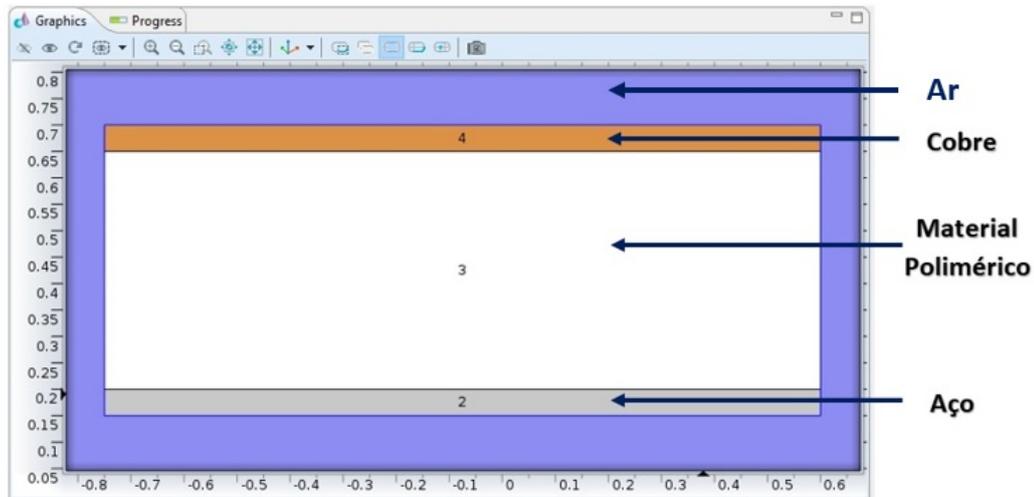
Figura 21 – Modelo de eletrodo de placas paralelas.



Fonte: próprio autor.

Para que o COMSOL possa calcular corretamente o campo elétrico é necessário carregar os materiais que compõem o objeto sob estudo. O *software* possui uma vasta biblioteca e no momento em que o material é definido todas as características relacionadas ao tipo de física estudada são carregados automaticamente, sendo também permitido modificar esses parâmetros, no caso de algum material específico. Os materiais carregados neste exemplo serão o cobre e o aço como eletrodos e um material polimérico como dielétrico sólido separando as duas placas, como pode ser visto na Figura 22, os valores de permissividade adotados para cada material estão descritos na Tabela 2 (COSTA et al., 2009).

Figura 22 – Materiais que compõem o eletrodo de placas paralelas.



Fonte: próprio autor.

Tabela 2 – Parâmetros do eletrodo de placas paralelas

Material	Permissividade relativa
Ar	1
Materiais metálicos	1
Material polimérico	2,4

Fonte: COSTA, 2009, SILVA, 2013.

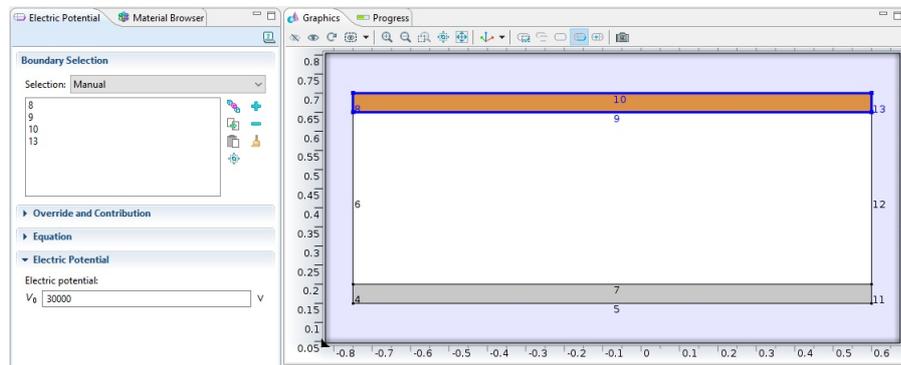
Neste trabalho serão utilizadas as condições de contorno de Dirichlet, definindo-se os valores de potencial sobre algumas regiões do objeto sob estudo, o que leva através dos cálculos a determinação dos valores de potencial ao longo de toda a superfície, inferior e meio envolvente do objeto estudado.

No COMSOL é possível selecionar as geometrias e informar o valor de tensão a que a mesma está submetida. O potencial ou campo elétrico nas demais regiões serão calculados por métodos iterativos. A seleção das geometrias (contornadas em azul) e definição dos níveis de potencial são ilustrados na Figura 23.

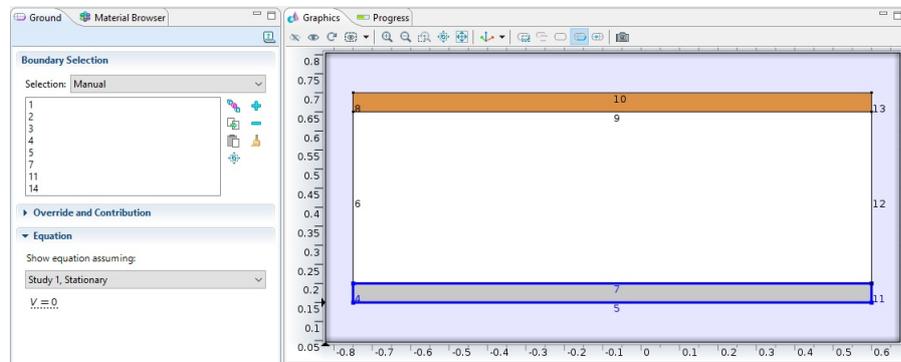
Após a definição de todos esses parâmetros, a malha é definida no software, ver Figura 24. Quanto maior o refinamento da malha maior será a exatidão dos resultados da simulação, porém isso também aumenta o esforço computacional. Devido a geometria simples deste exemplo foi utilizado uma malha com refinamento considerado normal pelo COMSOL.

Na Figura 25 é apresentada a simulação da distribuição do campo elétrico no eletrodo de placas paralelas. A intensidade do campo elétrico em cada ponto do objeto é definida através das cores, onde existe uma gradação do azul para o vermelho indicando

Figura 23 – Escolha das condições de contorno (a) Eletrodo com potencial de 30 kV (b) Eletrodo com potencial zero.



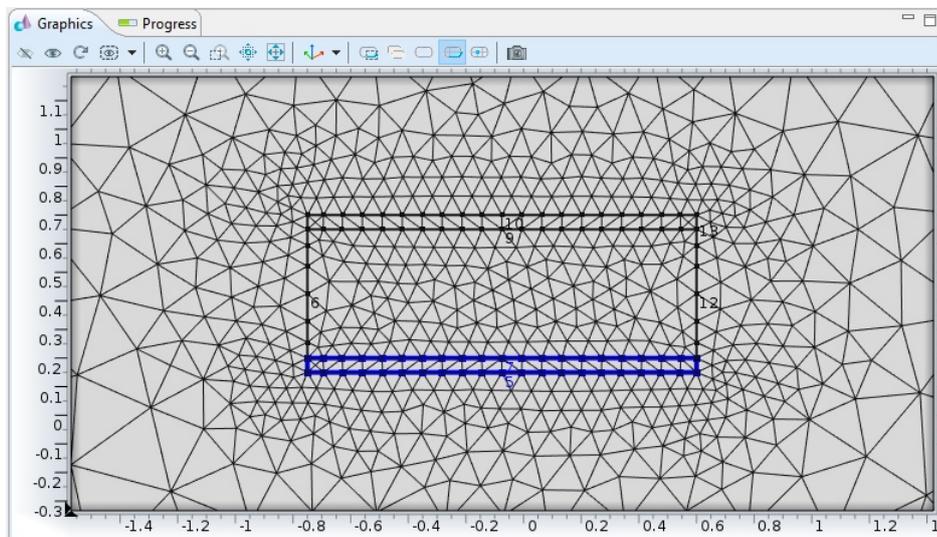
(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

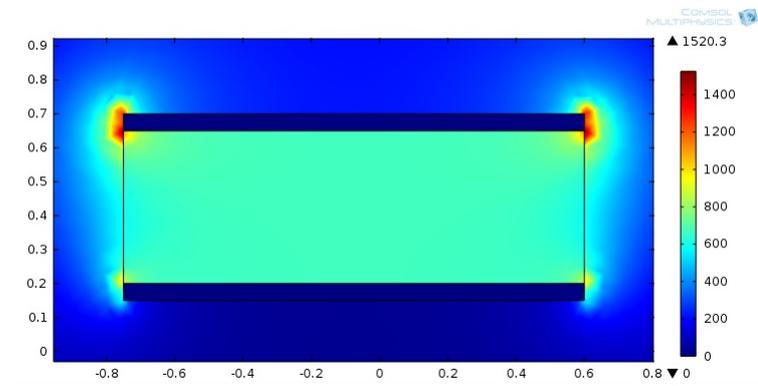
Figura 24 – Malha de elementos finitos triangulares.



Fonte: próprio autor.

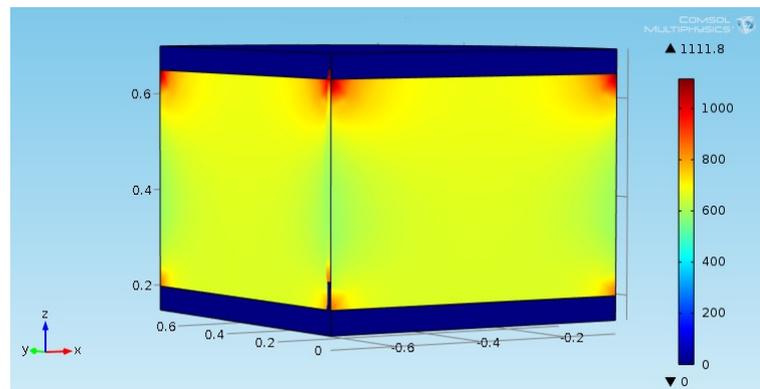
o menor e o maior nível de intensidade do campo elétrico respectivamente. O mesmo problema resolvido em duas dimensões (2D) também pode ser simulado em três dimensões (3D). A simulação pode ser visualizada na Figura 26.

Figura 25 – Simulação da distribuição do campo elétrico em 2D [kV/cm].



Fonte: próprio autor.

Figura 26 – Simulação da distribuição do campo elétrico em 3D [kV/cm].



Fonte: próprio autor.

## 3.4 Cavidades internas ao material isolante

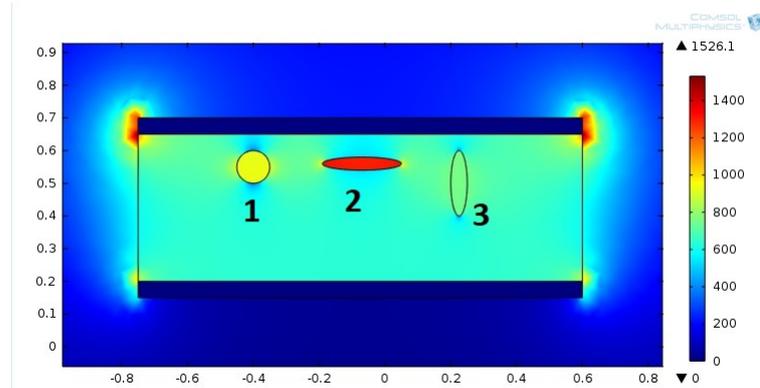
### 3.4.1 Escolha da geometria da cavidade

Uma das vantagens na utilização do COMSOL para os cálculos de campo elétrico é que torne-se possível inserir na mesma geometria simulada anteriormente, Figura 25, possíveis falhas internas na isolação.

Considerando que o eletrodo de placas paralelas possui falhas internas, que neste exemplo seriam três cavidades com geometrias diferentes. Fazendo um corte exatamente na posição em que se encontram as cavidades, ou bolhas de ar, pode ser obtida a representação registrada na Figura 27, e assim usar o COMSOL para simular a distribuição do campo

elétrico, incluindo a região interna às cavidades. Conforme realizado nas simulações anteriores, os materiais que compõem o objeto sob estudo devem ser informados para que o *software* possa fazer os cálculos corretos. Nesse caso considera-se que as cavidades são preenchidas por ar na pressão atmosférica.

Figura 27 – Campo elétrico no isolador com cavidades internas [kV/cm].



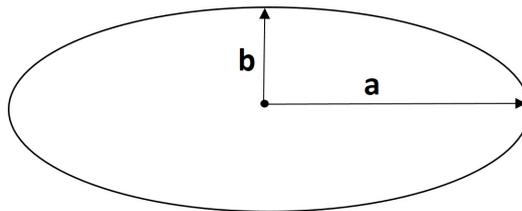
Fonte: próprio autor.

Percebe-se que a cavidade número 2 apresenta uma maior intensidade do campo elétrico em seu interior, o que aumenta as chances de falha nessa bolha. Devido a isso, as simulações realizadas nos isoladores poliméricos adotarão esse tipo de cavidade, assim torna-se possível analisar os casos de cavidades internas que causam um estresse elétrico significativo ao material isolante. Esse formato elipsoidal também é o mais comum nos 85 isoladores poliméricos com cavidades internas estudados por (SILVA, 2013).

Para verificações do nível de criticidade das cavidades, este trabalho considerará os semi-eixos **a** e **b** da elipse como variáveis para analisar a variação do campo elétrico na cavidade em função da variação de sua geometria.

Também será estudado um caso adicional em que exista uma rachadura no material polimérico, caso comum de ocorrer devido a estresses mecânicos aplicados ao isolador, verificando o comportamento do campo elétrico no interior dessa falha.

Figura 28 – Modelo de cavidade em formato elipsoidal.



Fonte: próprio autor.

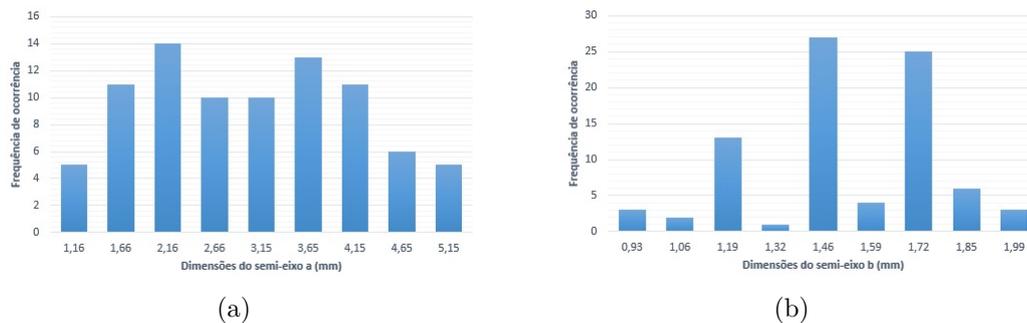
### 3.4.2 Escolha do tamanho inicial da cavidade simulada

Para simular cavidades internas aos isoladores estudados, utilizou-se o formato elipsoidal, conforme definido no item 3.4.1. Porém as dimensões da elipse, semi-eixos  $a$  e  $b$ , devem ser avaliadas.

Para iniciar as simulações com uma cavidade de dimensões próximas às encontradas na prática foram utilizados os dados obtidos no estudo realizado por (SILVA, 2013) em 85 isoladores poliméricos da classe de 15 kV utilizados em linhas de distribuição com a presença de cavidades em seu interior. Com o auxílio do software ISee!(2010) foi possível identificar através de imagens de raio X as dimensões de cada cavidade, como a maioria apresentou o formato elipsoidal, foram levantados os tamanhos dos semi-eixos  $a$  e  $b$ , no caso de geometrias bidimensionais, e também do semi-eixo  $c$  para o caso de estudos com geometrias tridimensionais.

Este trabalho adota como dimensões padrão os semi-eixos que surgiram com maior frequência no trabalho de (SILVA, 2013). Este levantamento pode ser verificado nos histogramas da Figura 29. Desta forma foi definido que as dimensões iniciais das cavidades utilizadas nas simulações são 2,16 mm para o semi-eixo  $a$  e 1,46 mm para o semi-eixo  $b$ . Essa dimensão de cavidade será utilizada para todas as simulações, incluindo os estudos nos isoladores de suspensão, mesmo que esse tipo de isolador não possua o mesmo processo fabril, assim todo o método de avaliação nos isoladores deste trabalho será padronizado.

Figura 29 – Frequência de ocorrência das cavidades por tamanho (a) Semi-eixo  $a$  (mm) (b) Semi-eixo  $b$  (mm).



Fonte: próprio autor.

## 3.5 Desenhos no AutoCAD

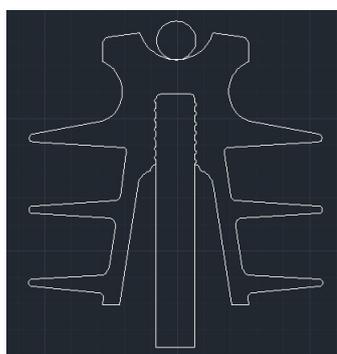
Como o caso estudado no exemplo demonstrado em 3.3 apresentava uma geometria simples, o próprio editor gráfico do COMSOL pôde ser utilizado, porém quando se trata de objetos com geometrias mais complexas, como os isoladores poliméricos, é aconselhável a utilização de um *software* mais completo nesse quesito, como o AutoCAD. Após a

modelagem do objeto no AutoCAD o mesmo pode ser exportado para o COMSOL que utiliza a geometria como base para a simulação.

### 3.5.1 Desenho isolador polimérico de 15 kV

O desenho utilizado para este isolador foi o mesmo utilizado no trabalho de (SILVA, 2013) e pode ser visto na Figura 30, além do isolador também é representado o condutor de cobre de raio 9,15 mm e o pino de fixação, onde serão definidos o nível de tensão adotado na simulação e a referência 0 V, respectivamente.

Figura 30 – Modelo CAD para o isolador de 15 kV



Fonte: próprio autor.

### 3.5.2 Desenho do isolador polimérico 245 kV

Foi utilizado como base para o desenho deste isolador, o desenho comercial do fabricante, com as informações do mesmo foram inseridos no desenho o número total de aletas e a haste do núcleo. Nesse caso é possível desenhar apenas um semi-eixo do isolador, conforme a ilustração feita na Figura 31. Devido a sua simetria, a avaliação não perderá nenhuma informação.

Figura 31 – Modelo CAD para o isolador de 245 kV



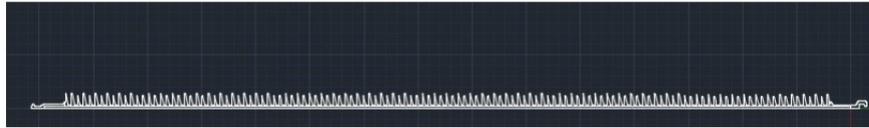
Fonte: próprio autor.

### 3.5.3 Desenho do isolador polimérico 550 kV

Foi utilizado o isolador de suspensão de classe de tensão de 550 kV que já foi estudado em trabalhos anteriores, (LOPES, 2016), porém sem a presença de cavidades internas.

Da mesma forma que o isolador de 245 kV, foi realizado uma representação de um semi-eixo do isolador com todos os seus componentes, núcleo, aletas e ferragens, para simulação no COMSOL. Ver figura 32.

Figura 32 – Modelo CAD para o isolador de 550 kV



Fonte: próprio autor.

### 3.6 Modelagem da poluição depositada nos isoladores utilizando o COMSOL Multiphysics

Para uma maior semelhança das simulações com as condições reais em que se encontram os isoladores, também consideraram-se vários níveis de camada de poluição depositada na superfície dos mesmos.

Ao utilizar uma aproximação volumétrica considera-se que a camada condutiva como um material dielétrico condutivo modelado geometricamente como uma fina camada sobre toda a superfície do isolador. A simulação dessa camada na geometria do objeto apresenta grande dificuldade.

Segundo (VOLAT, 2013) quando consideramos que a camada de poluição é muito fina e uniforme, a corrente de condução e a densidade de corrente de deslocamento podem ser consideradas uniformes ao longo da espessura  $d$ . Assim pode-se aproximar a camada de poluição através de uma superfície condutiva. No COMSOL essa superfície condutiva é modelada através de uma condição de contorno que leva em conta a equação 3.1. Esse método é conhecido como aproximação superficial.

$$-d(\sigma_v + jw\varepsilon)\nabla^2 V + jw\rho_s = 0 \quad (3.1)$$

Sendo:

$d$  = espessura da camada de poluição ( $10^{-6}$  m);

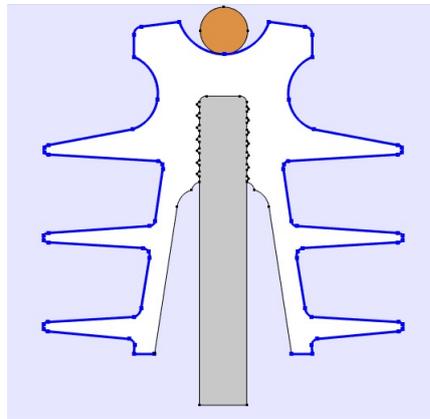
$\sigma_v$  = condutividade volumétrica da poluição ( $10^{-9}$  S/m);

$\varepsilon$  = permissividade absoluta da poluição (15 F/m);

$\rho_s$  = densidade superficial de carga (aproximadamente 0 C/m<sup>2</sup>).

Por falta de estudos completos e referentes aos valores de densidade superficial de carga, uma boa aproximação que pode ser considerada é fazer com que seu valor seja igual a zero (LOPES, 2016). O método de aproximação superficial obtém resultados praticamente iguais a uma aproximação volumétrica, porém com um esforço computacional bem menor, devido a isso esse método foi o escolhido para modelar a poluição nos isoladores. Para que o *software* possa considerar os efeitos da poluição, a equação 3.1 é inserida como uma contribuição e são informados os pontos da geometria do material que estão submetidos a esse efeito. Na Figura 33 apresenta-se um exemplo da seleção dessa geometria em um isolador da classe de 15 kV.

Figura 33 – Superfície submetida a poluição em isolador de classe 15 kV



Fonte: próprio autor.

Para a otimizar a simulação da poluição como uma condição de contorno foi considerado que a camada de poluição se distribui uniformemente ao longo de toda a superfície do isolador.

Todas as análises deste trabalho são realizadas considerando-se 3 níveis de poluição na superfície do isolador, dividindo-se em: poluição nível leve, poluição nível médio e poluição nível alto.

Os níveis de poluição são definidos conforme sua condutividade volumétrica, (LOPES, 2016, VOLAT, 2013). Os valores estão relacionados na tabela 3.

Tabela 3 – Características dos níveis de poluição

<b>Poluição</b>	<b>Condutividade Volumétrica (<math>\sigma_v</math>)</b>
Nível Leve	$10^{-8}$ (S/m)
Nível Médio	$10^{-6}$ (S/m)
Nível Alto	$10^{-4}$ (S/m)

Fonte: LOPES, 2016.

### 3.7 Modelagem dos isoladores poliméricos utilizando o COMSOL

Para a modelagem dos isoladores poliméricos utilizando o *software* COMSOL Multiphysics, foi utilizado o módulo de eletrostática, que pertence ao pacote AC/DC do COMSOL, que é o módulo mais adequado para cálculos de potencial e campo elétrico.

Escolheu-se utilizar as simulações no ambiente de duas dimensões (2D), por motivos de facilidade de implementação e agilidade na simulação de diferentes tipos de cavidades.

Neste caso são utilizadas as condições de contorno de Dirichlet, ou seja, utiliza-se como condições de contorno os valores das grandezas e não de suas derivadas. As grandezas utilizadas são o valor do potencial ao qual o isolador está submetido e o local do isolador onde o mesmo está no potencial de terra, 0 V. Para cada isolador simulado é definida a permissividade relativa de cada material selecionando sua geometria.

Após a simulação, são obtidas informações como a quantidade de elementos da malha criada pelo *software*, distribuição de potencial e do campo elétrico ao longo do isolador.

Posteriormente os isoladores serão simulados considerando o nível de poluição depositada sobre sua superfície, também serão realizadas simulações com a cavidade interna posicionada mais próxima a fase e um segundo caso onde a cavidade está posicionada mais próxima ao lado do terra, analisando-se a posição mais crítica.

Uma outra avaliação é realizada variando-se a geometria da cavidade elipsoidal, alterando o semi-eixo  $a$  da cavidade tornando-a mais semelhante a cavidade de número 2 comentada na Figura 27 e verificando-se a alteração do campo elétrico interno proveniente desta alteração de tamanho.

Por fim é verificada a variação da tensão aplicada nos isoladores e sua influência na variação do campo elétrico interno da cavidade.

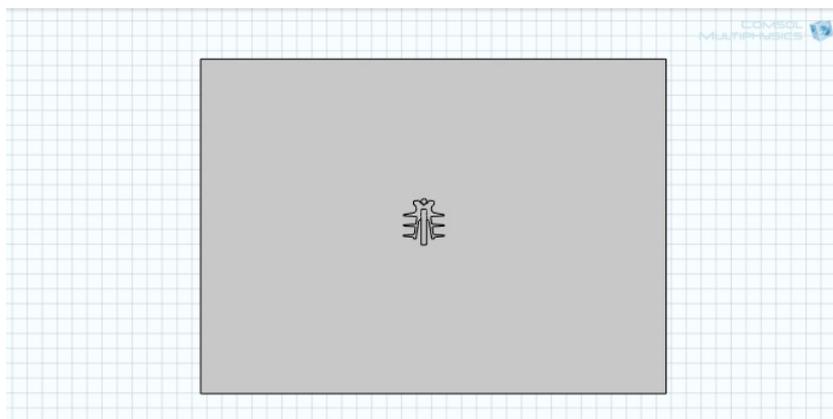
Para demonstrar como o *software* apresenta seus resultados, primeiramente os isoladores serão simulados sem a presença de cavidades internas e sem nenhuma camada de poluição. Os resultados podem ser verificados nas próximas seções.

#### 3.7.1 Isolador polimérico de pino classe 15 kV

Após exportar a geometria do AutoCAD para o COMSOL, é definido um espaço de simulação, que consiste em um retângulo que faz o papel do ar ambiente que cerca o isolador, conforme ilustrado na Figura 34.

Uma exigência adotada para esse retângulo é que suas dimensões devem ser de pelo menos 5 vezes o tamanho do isolador que será estudado para que não influencie no valor do campo elétrico.

Figura 34 – Geometria para simulação no COMSOL



Fonte: próprio autor.

### 3.7.1.1 Definição dos materiais

Com a utilização do módulo físico de eletrostática no COMSOL, faz-se necessário a definição da permissividade relativa para cada material. Os valores adotados para este isolador podem ser vistos na tabela 4 e estão de acordo com os adotados em outros trabalhos (SILVA, 2013).

Tabela 4 – Parâmetros do isolador polimérico de 15 kV

Material	Permissividade relativa
Ar	1
Condutor de cobre	1
Pino de fixação (aço)	1
Material das aletas (polímero)	2,4

Fonte: FERREIRA, 2009, SILVA, 2013.

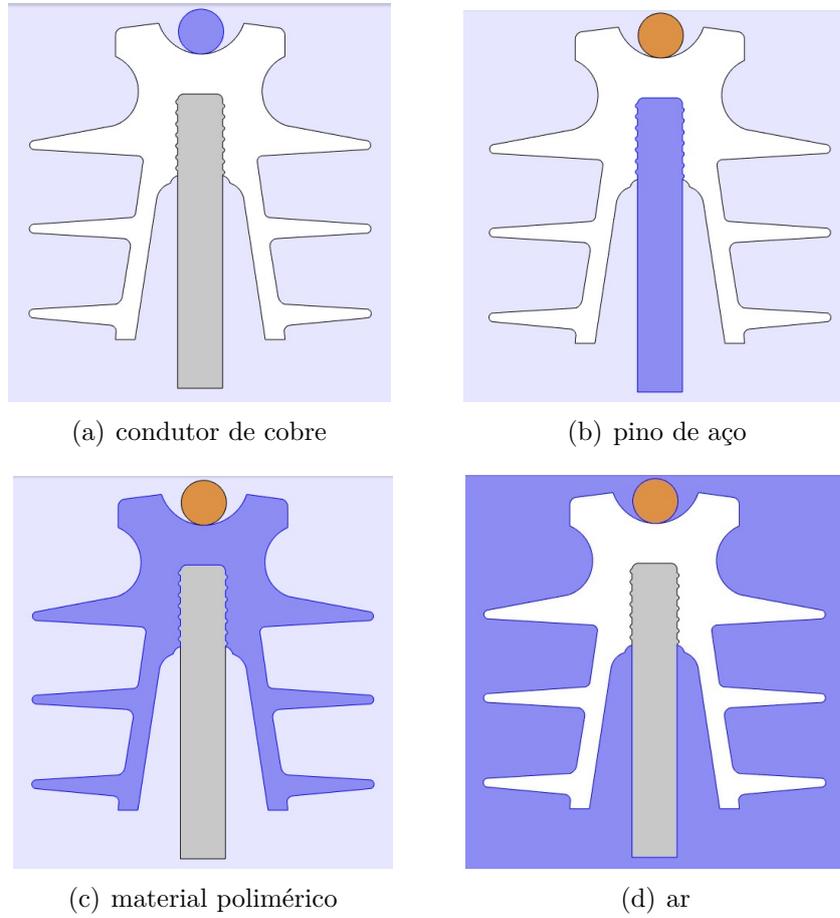
### 3.7.1.2 Condições de contorno

Para a solução do problema físico utilizando o método dos elementos finitos é necessário estabelecer as condições de contorno.

Como quaisquer outras equações diferenciais, os problemas nas equações de Maxwell só podem ser resolvidos se acompanhados de condições de fronteira aplicáveis nos limites da região geométrica coberta pelo problema em questão. (SILVESTER; FERRARI, 1996).

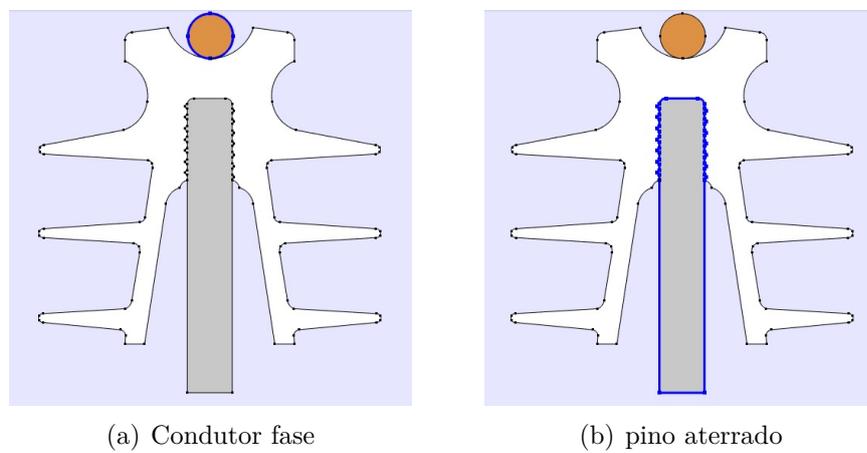
No caso do isolador de 15 kV, foi considerado que o condutor está submetido a um valor de tensão de pico de  $13,8kV \times (\sqrt{2}/\sqrt{3})$ , ou seja, 11,27 kV. Como o pino é conectado a estrutura de concreto, consideramos que o mesmo está aterrado, no COMSOL é selecionada a sua geometria e aplicado o potencial 0 V.

Figura 35 – Seleção de materiais - isolador de 15 kV



Fonte: próprio autor.

Figura 36 – Condições de contorno



Fonte: próprio autor.

### 3.7.1.3 Definição da Malha

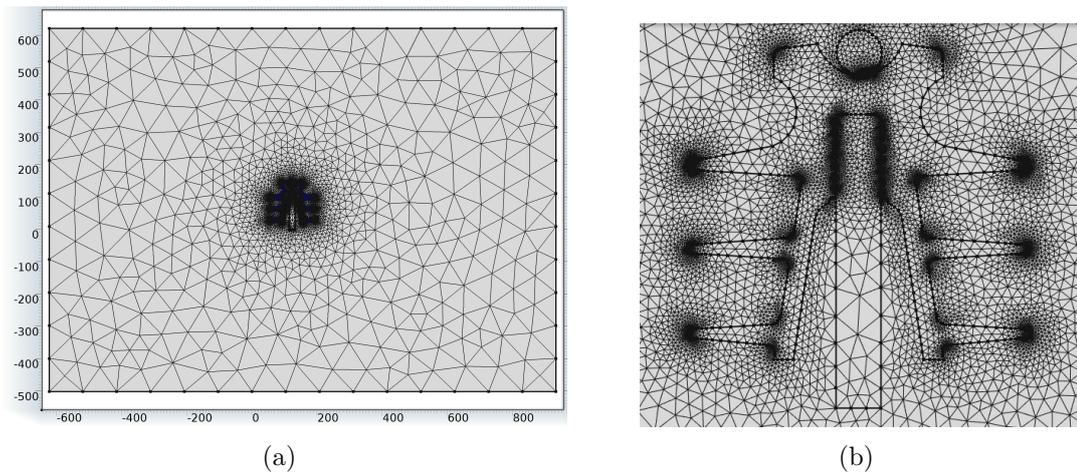
A malha utilizada na simulação é a malha definida pelo COMSOL, a mesma é automaticamente definida como triangular com um nível de refinamento chamado de "normal" pelo *software*. A malha pode ser configurada para ter um nível maior de refinamento. Porém como essa alteração não consistiu em um ganho significativo nos resultados, adotou-se a malha original. As informações referentes a malha podem ser vistas na Tabela 5 e Figura 37.

Tabela 5 – Informações da malha, isolador de 15 kV

Quantidade de Vértices	134
Quantidade de Arestas	998
Quantidade de Elementos	20.030

Fonte: próprio autor.

Figura 37 – Malha de elementos finitos - isolador de 15 kV



Fonte: próprio autor.

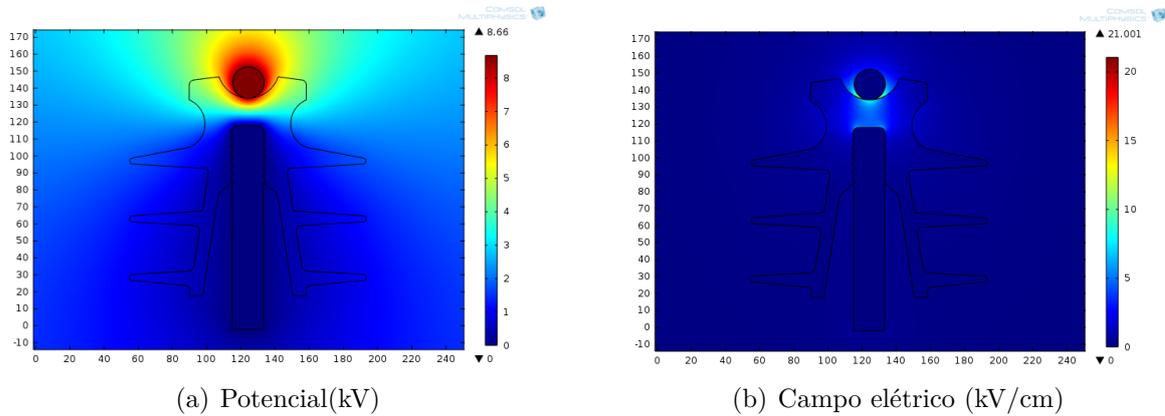
### 3.7.1.4 Simulações preliminares do isolador sem a presença de cavidades

As distribuições de potencial e de campo elétrico ao longo do isolador são apresentados na Figura 38, onde os níveis de potencial e de intensidade do campo elétrico podem ser verificados pela escala de cores definidas na coluna à direita das figuras (a) e (b) respectivamente.

## 3.7.2 Isolador polimérico de suspensão de classe 245 kV

Da mesma forma que o caso anterior, o modelo do isolador foi desenhado no AutoCAD e exportado para o COMSOL. No *software* também foi definido um espaço

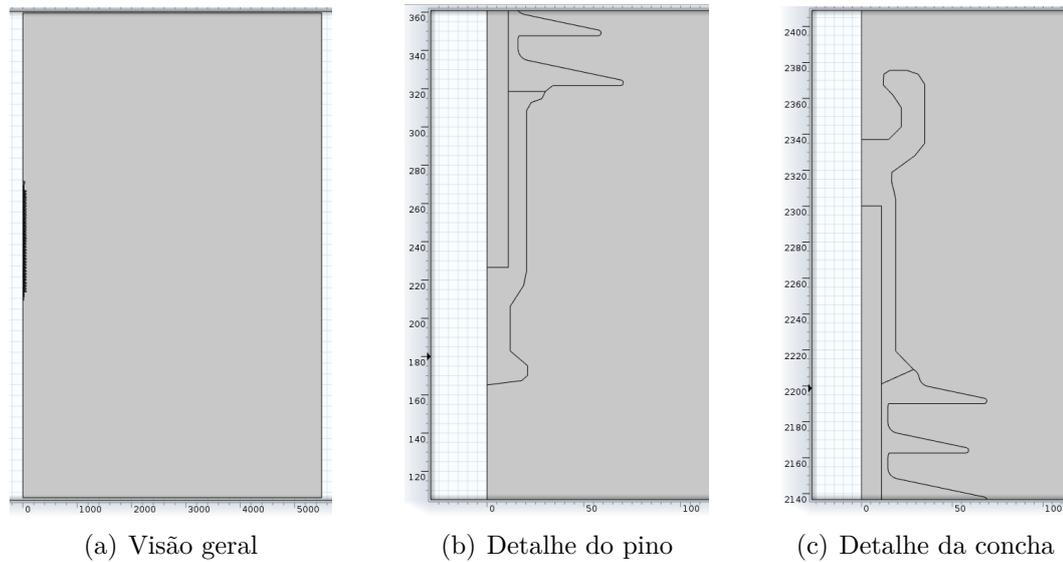
Figura 38 – Distribuição de potencial e campo elétrico no COMSOL - Isolador de 15 kV



Fonte: próprio autor.

de simulação, que consiste em um retângulo que representa o ar ambiente que cerca o isolador. O modelo definido no software pode ser visualizado na Figura 39.

Figura 39 – Modelo de isolador classe 245 kV para simulação



Fonte: próprio autor.

### 3.7.2.1 Definição dos materiais

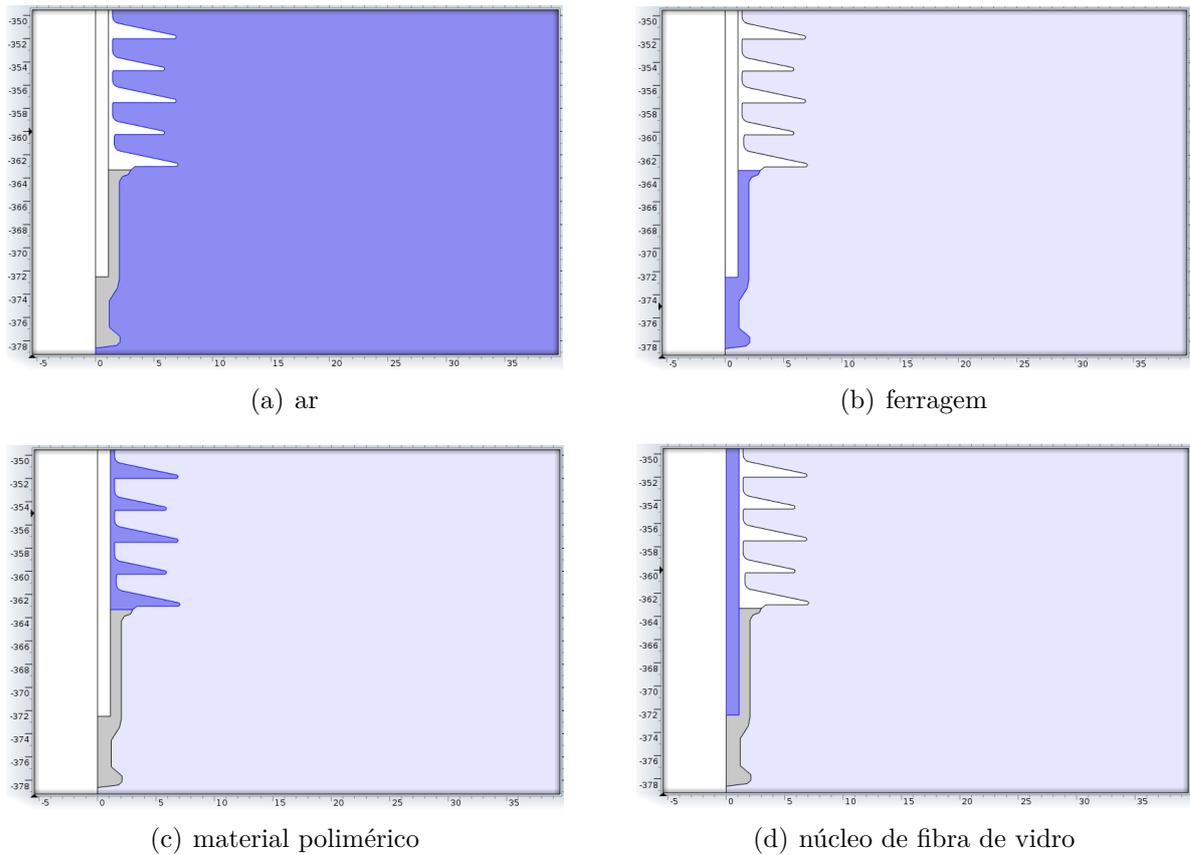
Neste modelo foram utilizados os valores de permissividade encontrados nos trabalhos de (LOPES, 2016) e (ZHAO; COMBER, 2000), que estão descritos na Tabela 6 e representados na Figura 40.

Tabela 6 – Parâmetros do isolador polimérico de 245 kV

Material	Permissividade relativa
Ar	1
Bastão de fibra de vidro	7,2
Ferragens de fixação	1
Material das aletas (polímero)	4,5

Fonte: FERREIRA, 2009, LOPES, 2016.

Figura 40 – Seleção de materiais - isolador de 245 kV



Fonte: próprio autor.

### 3.7.2.2 Condições de contorno

Como condições de contorno para a simulação deste isolador definiu-se o valor de tensão aplicado no pino inferior e definido que a ferragem superior, que está em contato com a estrutura, está submetida a tensão 0V, estando aterrada. A seleção dessas duas regiões no COMSOL pode ser observada na Figura 42.

A tensão aplicada a ferragem inferior é a tensão igual a  $230 \text{ kV} \times (\sqrt{2}/\sqrt{3})$ , ou seja, 187,80 kV, que é o nível de tensão de pico ao qual o isolador é submetido na linha de transmissão.

Figura 41 – Condições de contorno - isolador 245 kV

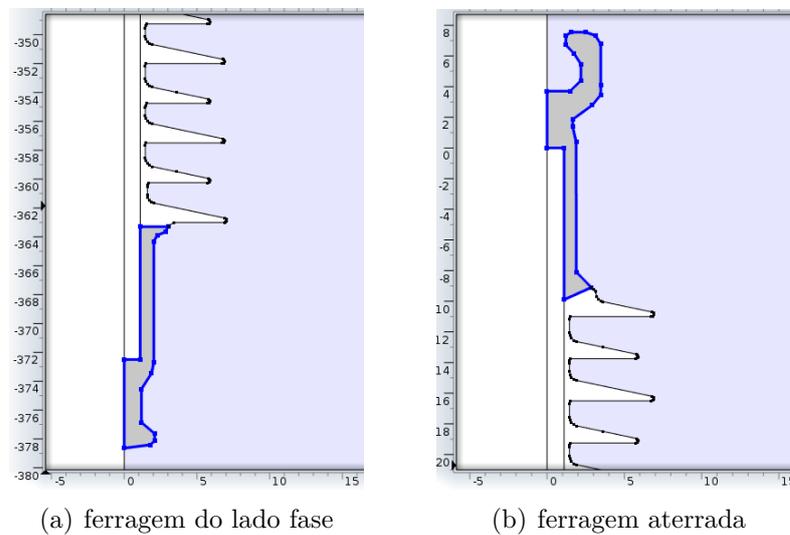


Figura 42 – Fonte: próprio autor.

### 3.7.2.3 Definição da malha

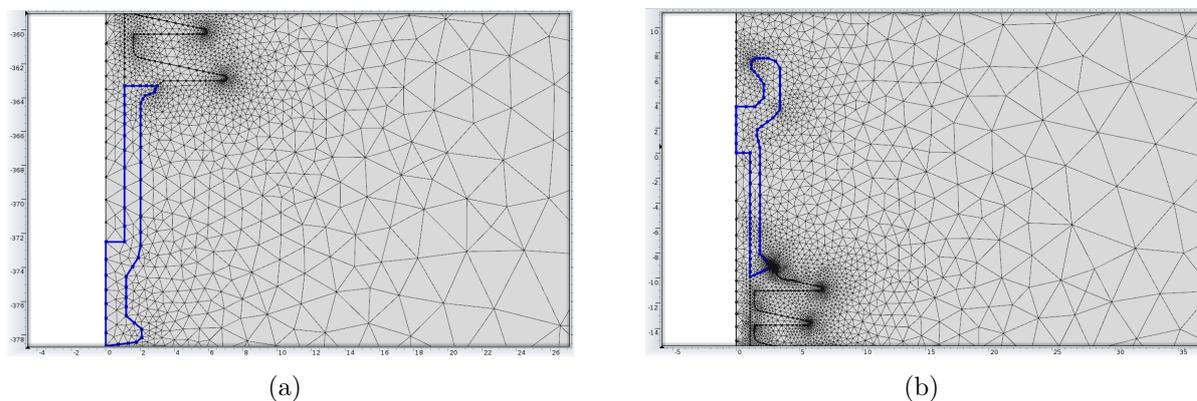
A malha utilizada novamente foi definida pelo COMSOL como uma malha de elementos triangulares com um nível de refinamento extra-fino devido ao grande número de detalhes do isolador. As informações referentes a malha podem ser vistas na Tabela 7 e na Figura 43.

Tabela 7 – Informações da malha, isolador de 245 kV

Quantidade de Vértices	937
Quantidade de Arestas	4358
Quantidade de Elementos	74.578

Fonte: próprio autor.

Figura 43 – Malha de elementos finitos - isolador de 245 kV



Fonte: próprio autor.

### 3.7.2.4 Simulações preliminares do isolador sem a presença de cavidades

As distribuições de potencial e de campo elétrico ao longo do isolador são apresentadas na Figura 44, onde os níveis de potencial e de intensidade do campo elétrico podem ser verificados pela escala de cores definidas na coluna à direita das figuras (a) e (b) respectivamente.

### 3.7.3 Isolador polimérico de suspensão de classe 550 kV

Da mesma forma que nos casos anteriores, o modelo do isolador foi desenhado no AutoCAD e exportado para o COMSOL. No *software*, assim como nas outras simulações, foi definido um espaço de simulação, que consiste em um retângulo que representa o ar ambiente que cerca o isolador. Devido à geometria do isolador de suspensão foi realizado o desenho de metade do isolador pois o modelo é simétrico. O modelo definido no software pode ser visualizado na Figura 45.

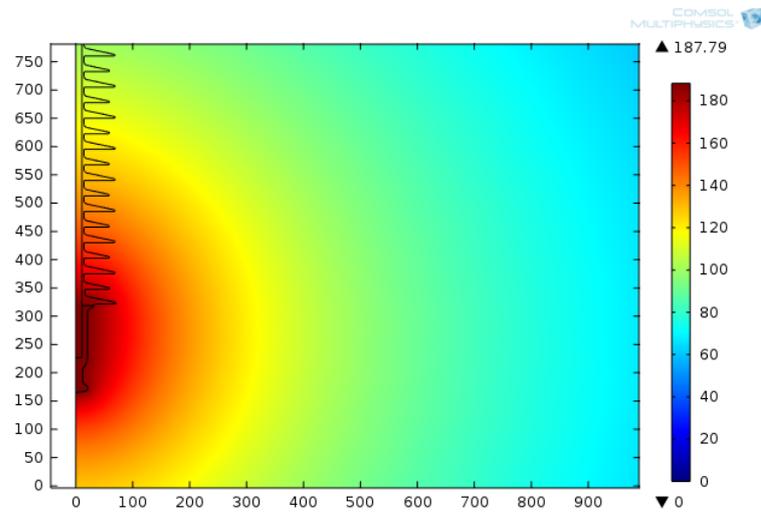
#### 3.7.3.1 Definição dos materiais

Neste modelo, como os projetos são muito semelhantes, a geometria dos materiais e valores de permissividade são os mesmos utilizados no isolador de 245 kV, representados na Tabela 6 e Figura 40. O diferencial do isolador de 550 kV é o maior número de aletas, o que também aumenta seu comprimento, mas não afeta a escolha dos materiais.

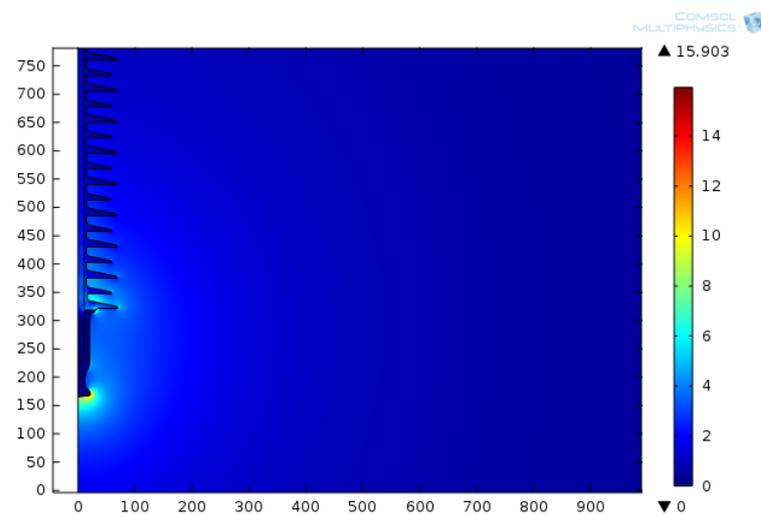
#### 3.7.3.2 Condições de contorno

Como condições de contorno para a simulação deste isolador definiu-se o valor de tensão aplicado no pino inferior e definido que a ferragem superior, que está em contato

Figura 44 – Distribuição de potencial e campo elétrico no COMSOL - Isolador de 245 kV



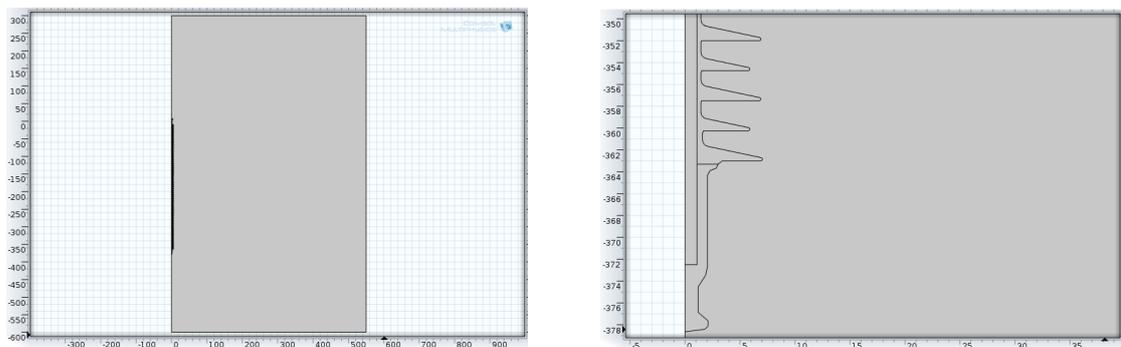
(a) Potencial (kV)



(b) Campo elétrico (kV/cm)

Fonte: próprio autor.

Figura 45 – Modelo de isolador classe 550 kV para simulação



(a) Visão geral

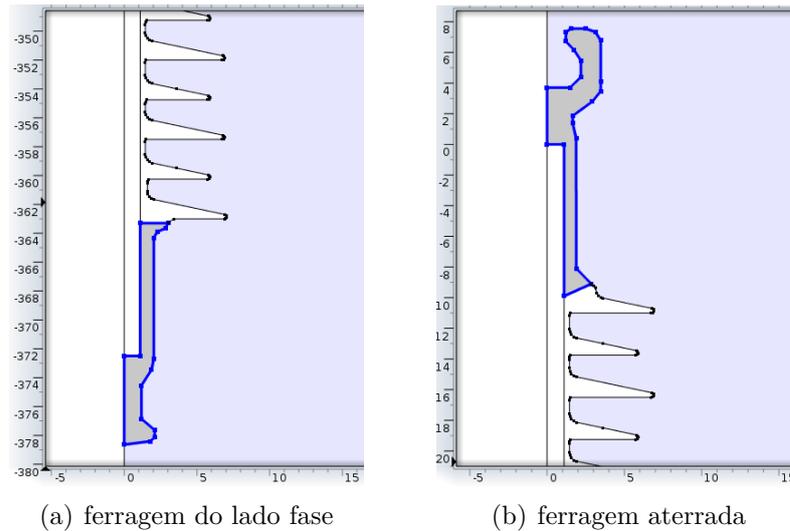
(b) Detalhe do pino

Fonte: próprio autor.

com a estrutura, está submetida a tensão 0V, ou seja, está aterrada. A seleção dessas duas regiões no COMSOL pode ser observada na Figura 46

A tensão aplicada a ferragem inferior é a tensão igual a  $500 \text{ kV} \times (\sqrt{2}/\sqrt{3})$ , ou seja, 408,25 kV, que é o nível de tensão de pico ao qual o isolador é submetido na linha de transmissão.

Figura 46 – Condições de contorno - isolador de 550 kV



Fonte: próprio autor.

### 3.7.3.3 Definição da malha

A malha utilizada novamente foi definida pelo COMSOL como uma malha de elementos triangulares com um nível de refinamento extra-fino devido ao grande número de detalhes do isolador. As informações referentes à malha podem ser vistas na Tabela 8 e na Figura 47.

Tabela 8 – Informações da malha, isolador de 550 kV

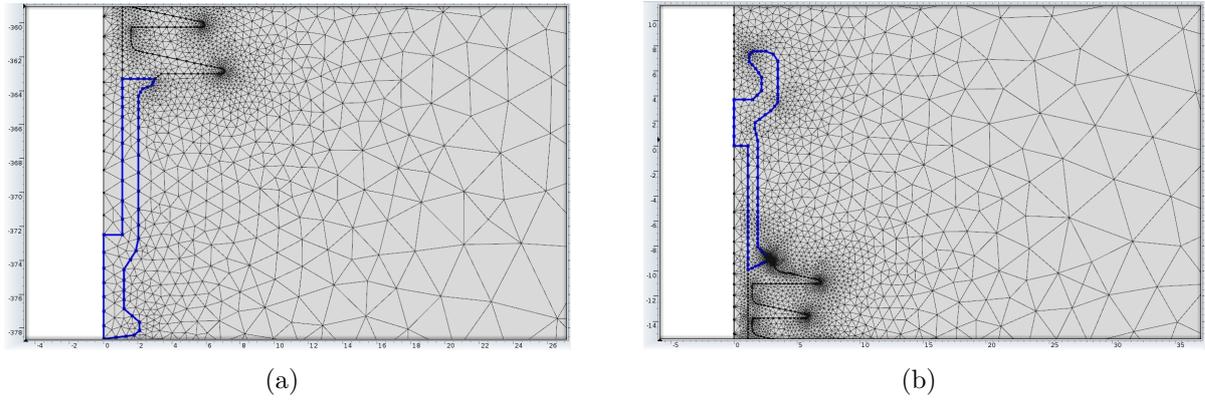
Quantidade de Vértices	1717
Quantidade de Arestas	7801
Quantidade de Elementos	144.062

Fonte: próprio autor.

### 3.7.3.4 Simulações preliminares do isolador sem a presença de cavidades

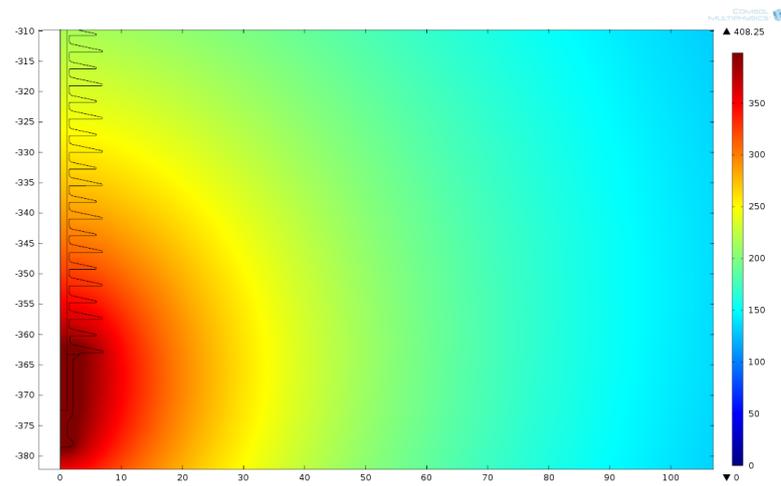
As distribuições de potencial e de campo elétrico ao longo do isolador são apresentados na Figura 48.

Figura 47 – Malha de elementos finitos - isolador de 550 kV

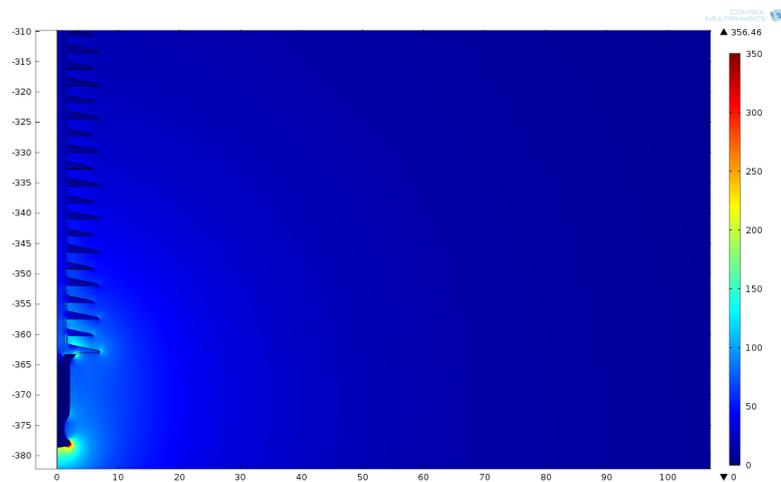


Fonte: próprio autor.

Figura 48 – Distribuição de potencial e campo elétrico no COMSOL - Isolador de 550 kV



(a) Potencial (kV)



(b) Campo elétrico (kV/cm)

Fonte: próprio autor.

Verifica-se pelas simulações que o número de elementos finitos para realização dos cálculos é consideravelmente alto para que o MEF fosse aplicado manualmente, assim comprova-se a importância de um software de simulação para aplicação em casos em que o objeto sob estudo possui uma geometria com maior número de detalhes.

Uma vez definidos os modelos dos isoladores no COMSOL e suas distribuições de campo elétrico, o próximo passo é a adição de cavidades internas ao material isolante posicionadas em regiões mais críticas, ou seja, regiões onde existe uma maior concentração do campo elétrico e monitorar o comportamento do isolador nessas condições para, juntamente com os conceitos levantados na fundamentação teórica, seja possível avaliar a possibilidade de surgimento de descargas parciais internas, o que seria prejudicial a vida útil do isolador.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Esta seção destina-se a apresentar as simulações dos isoladores poliméricos apresentados no capítulo anterior, agora com a presença de cavidades internas ao material isolante e analisar o comportamento do campo elétrico dentro da cavidade, esses resultados serão posteriormente comparados com os valores calculados pela lei de Paschen para definir se o campo elétrico na cavidade é o suficiente para causar descargas parciais internas.

Conforme descrito na seção 3.6, os efeitos da poluição depositada na superfície dos isoladores também serão levados em conta nas simulações deste trabalho. Para cada uma das posições adotadas da cavidade, haverá dois tipos de análise: variação do campo elétrico interno à cavidade em função do aumento das dimensões da mesma, e a outra análise será a variação do campo elétrico interno à cavidade em função do aumento do nível da tensão ao qual o isolador está submetido. Para cada uma dessas análises serão utilizados três níveis de poluição depositada na superfície dos isoladores poliméricos. Os níveis de poluição são diferenciados na simulação alterando-se a condutividade volumétrica ( $\sigma_v$ ) de acordo com a Tabela 3

O *software* COMSOL foi utilizado para modelar a cavidade nos isoladores já simulados anteriormente. A cavidade utilizada no estudo tem formato elipsoidal conforme informado nos capítulos anteriores. Para o caso inicial as dimensões dos semi-eixos  $a$  e  $b$  são 2,16 mm e 1,46 mm respectivamente. Para detectar a influência da geometria na distribuição de campo elétrico, a dimensão do semi-eixo  $a$  será acrescida de 1 mm até que atinja 9,16 mm, enquanto o semi-eixo  $b$  permanece constante.

A tensão aplicada ao isolador terá uma variação de 1 pu à 3 pu, sendo sempre medidos os valores de pico da tensão, para que seja verificada a situação de maior estresse elétrico.

A variação da geometria e da tensão aplicada no isolador é implementada pelo COMSOL por meio da função *Parametric Sweep*, onde é possível alterar os valores de determinada variável automaticamente.

### 4.1 Isolador polimérico de pino classe 15 kV

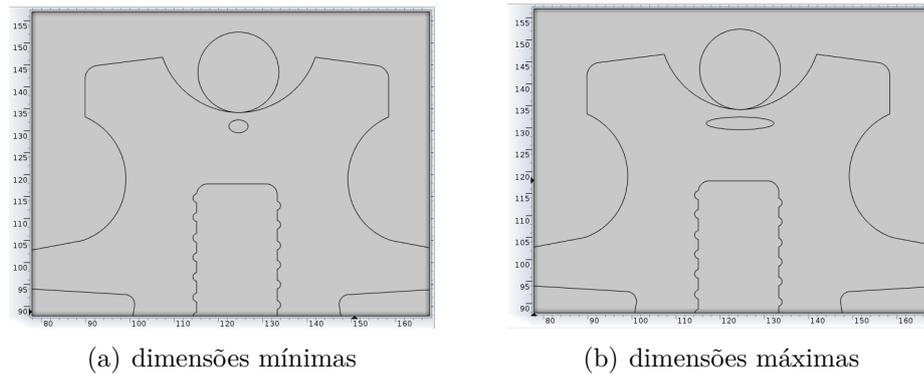
#### 4.1.1 Cavidade próxima a fase

##### 4.1.1.1 *Variação da geometria da cavidade*

Na Figura 49 pode-se verificar a inserção da cavidade com suas dimensões mínima ( $a = 2,16$  mm e  $b = 1,46$  mm) e máxima ( $a = 9,16$  mm e  $b = 1,46$  mm). O processo

de simulação será o mesmo adotado no capítulo anterior, agora com a presença de uma cavidade interna. Segundo (MARTINS, 2015), a região com maior ocorrência de defeitos nesse tipo de isolador é a região que separa o cabo condutor do pino. Considerandou-se que a região interna da cavidade é preenchida pelo ar atmosférico com as mesmas propriedades do ar externo ao isolador.

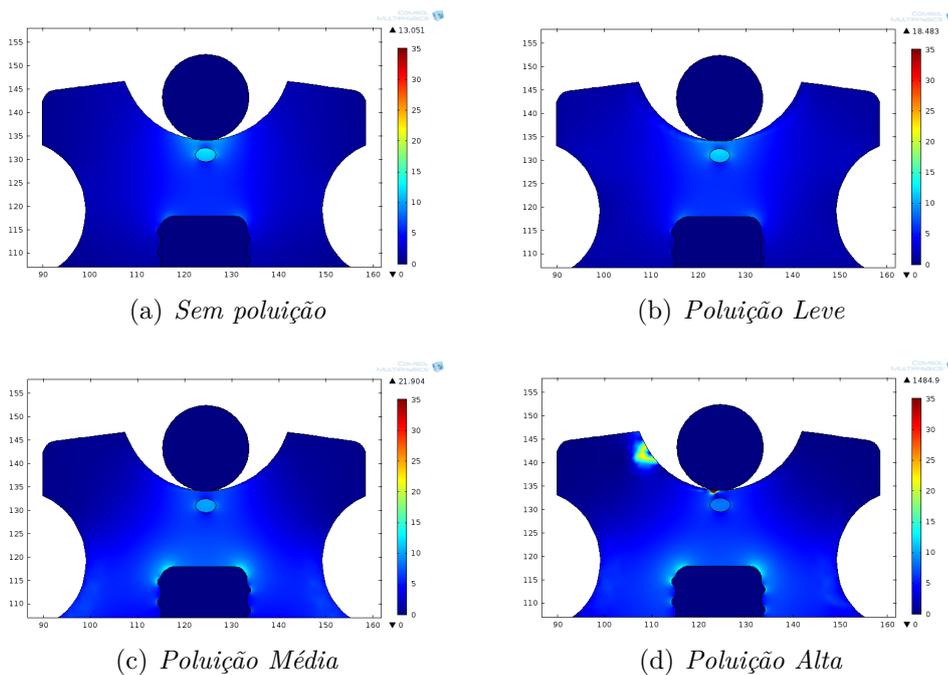
Figura 49 – Inclusão da cavidade no modelo simulado



Fonte: próprio autor.

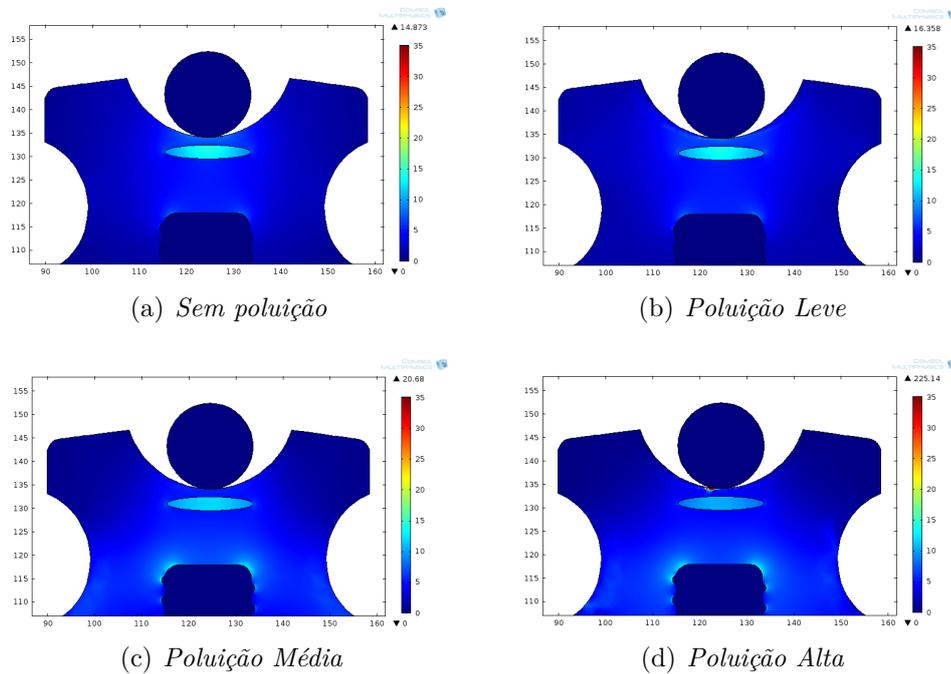
Na Figura 50 pode-se observar os resultados da distribuição de campo elétrico no isolador considerando a cavidade com as dimensões mínimas. Na Figura 51 têm-se o mesmo tipo de análise porém com a cavidade em seu tamanho máximo.

Figura 50 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima ao condutor.



Fonte: próprio autor.

Figura 51 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 9,16$  mm posicionada próxima ao condutor.



Fonte: próprio autor.

Para analisar a influência da poluição e da geometria da cavidade no campo elétrico interno à mesma, pode-se verificar o gráfico na Figura 52. Percebe-se o crescimento inicial do campo elétrico no interior da cavidade com o crescimento da cavidade, porém vê-se que esse campo tende a se estabilizar, pois a partir de determinado tamanho parte da cavidade deixa de ser influenciada pelo campo elétrico no dielétrico que está mais concentrado entre o condutor e o pino.

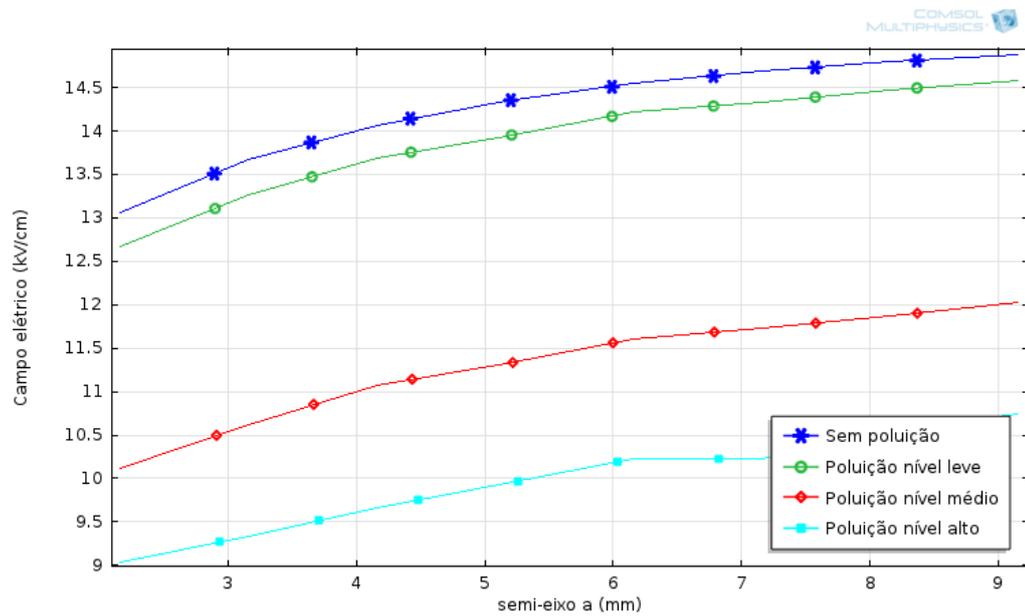
#### 4.1.1.2 *Variação da tensão aplicada ao isolador*

Nesta seção considera-se o caso em que a geometria da cavidade é constante e a tensão à que o isolador está submetido aumenta até uma tensão de 3 pu. assim a tensão no condutor irá variar de  $13,8kV \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$  até  $41,4kV \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$ , tratando-se da tensão fase-terra em seu valor de pico.

Os casos de variação da poluição depositada quando o isolador está submetido a uma tensão de 1 pu já foram verificados na Figura 50. Na Figura 53 têm-se a mesma variação da poluição, porém, neste caso o isolador está submetido a uma tensão de 3 pu.

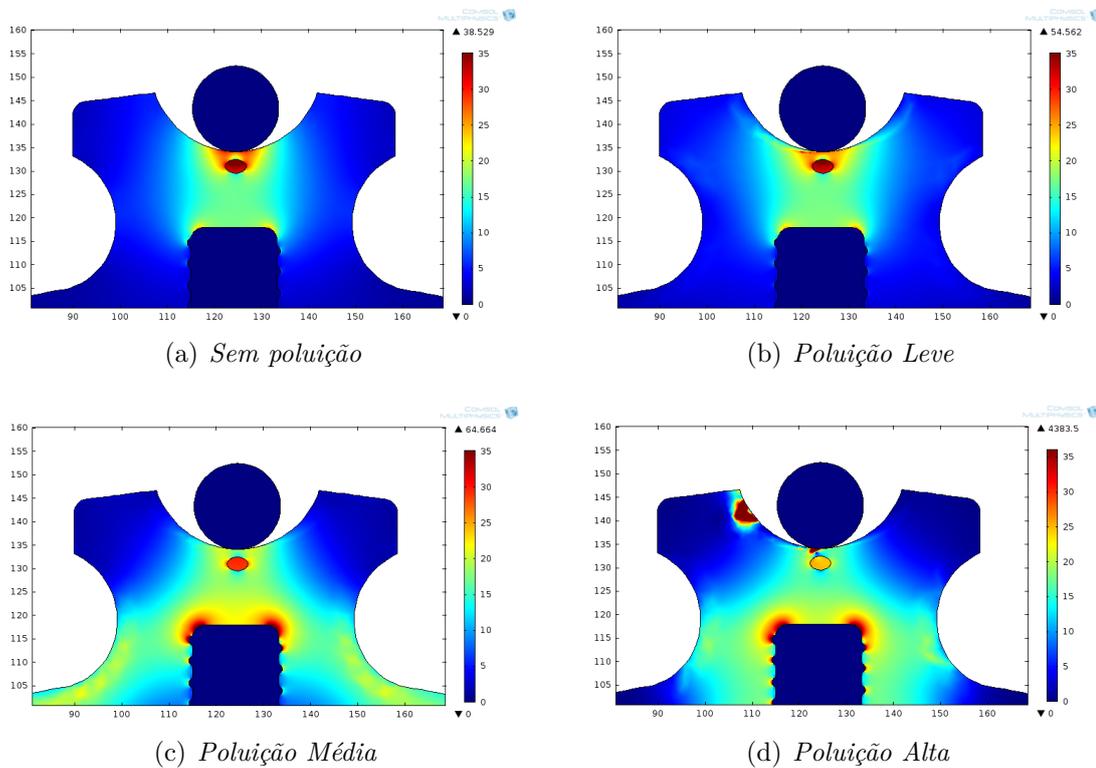
No gráfico da figura 54 está ilustrada a variação do campo elétrico máximo dentro da cavidade em função da variação da tensão aplicada no condutor, também considerando os efeitos da poluição. Como era esperado observa-se um crescimento linear do campo elétrico com o aumento da tensão aplicada ao isolador.

Figura 52 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo  $a$  da cavidade posicionada próxima ao condutor - isolador de classe 15 kV.



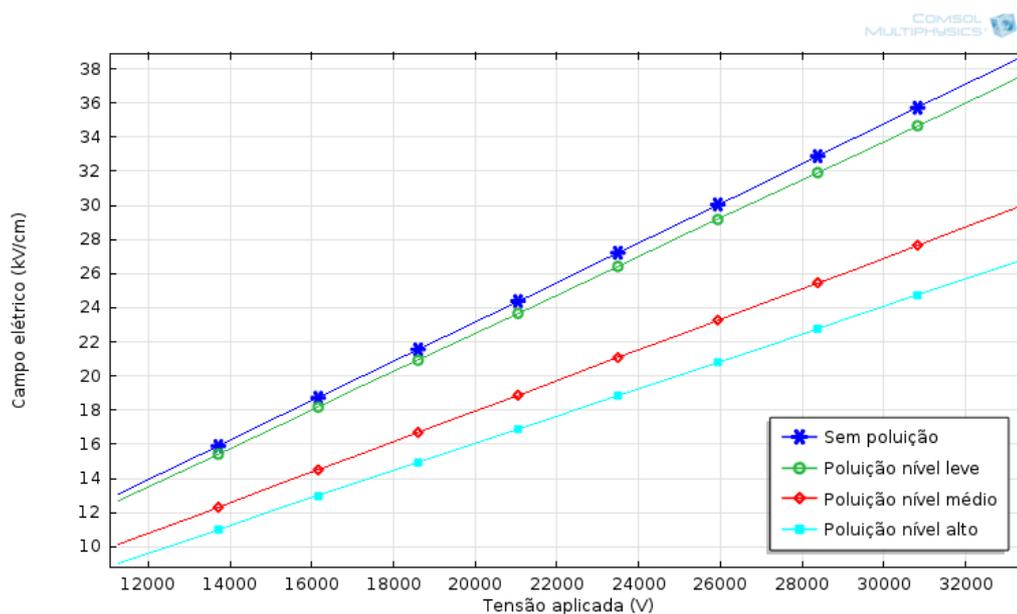
Fonte: próprio autor.

Figura 53 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima ao condutor.



Fonte: próprio autor.

Figura 54 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima ao condutor em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV.



Fonte: próprio autor.

Nos dois casos apresentados em que a cavidade situa-se mais próxima ao condutor percebe-se que o aumento da camada de poluição na superfície do isolador, altera a distribuição do campo elétrico em sua superfície, porém, não significa que com o aumento da poluição o campo elétrico na cavidade será maior, pelo contrário, os gráficos 52 e 54 mostram que, para este caso, a intensidade do campo elétrico nas cavidades é maior quando o isolador está sem poluição em sua superfície.

#### 4.1.2 Cavidade próxima à ferragem aterrada

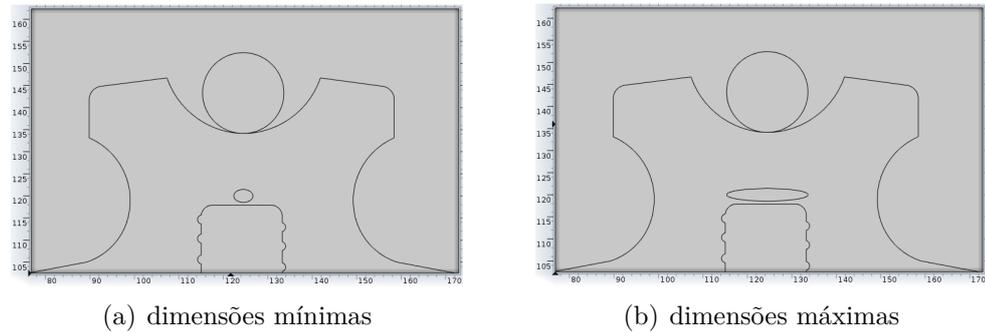
##### 4.1.2.1 Variação da geometria da cavidade

Na Figura 55 observa-se novamente as cavidades em suas dimensões mínimas ( $a = 2,16$  mm e  $b = 1,46$  mm) e máximas ( $a = 9,16$  mm e  $b = 1,46$  mm), porém, agora posicionadas próximo ao pino de suporte do isolador.

Nas Figuras 56 e 57 têm-se as mesmas análises realizadas no caso anterior, considerando os níveis de poluição e sua influência nas cavidades de tamanho mínimo e máximo.

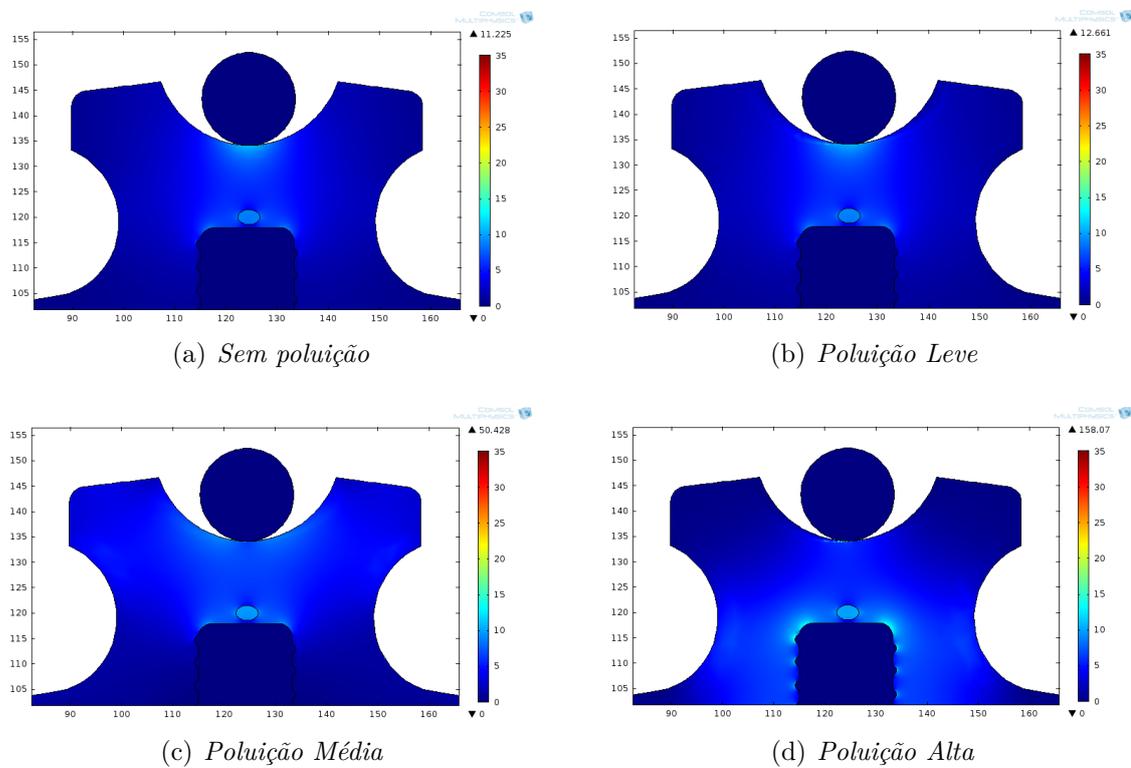
Também pode ser verificado através do gráfico da Figura 58 a variação do campo elétrico em função da variação da geometria da cavidade, novamente considerando os níveis de poluição depositada na superfície do isolador. Ao contrário do ocorrido no caso demonstrado na Figura 52, a poluição neste caso aumenta o campo elétrico no interior

Figura 55 – Cavidade posicionada próxima ao pino aterrado



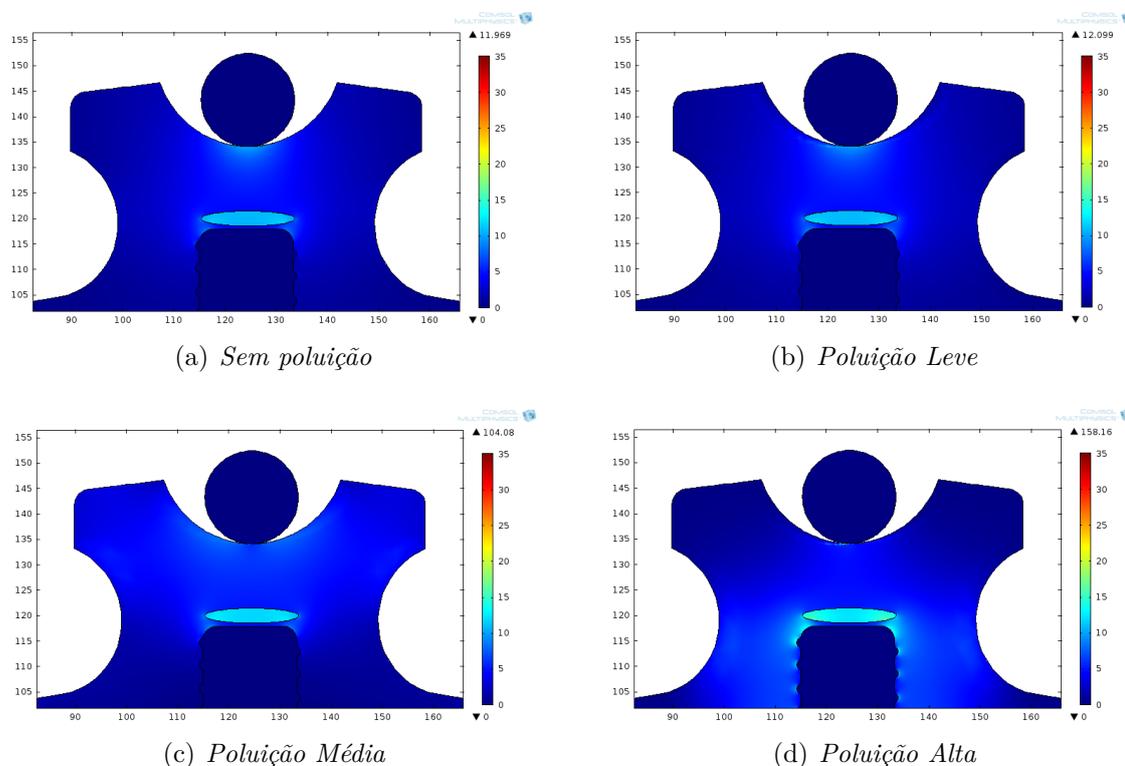
Fonte: próprio autor

Figura 56 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor.

Figura 57 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 9,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor.

da cavidade, isso ocorre devido a posição da mesma, que encontra-se em uma região do isolador onde o campo elétrico se intensifica com o aumento da poluição.

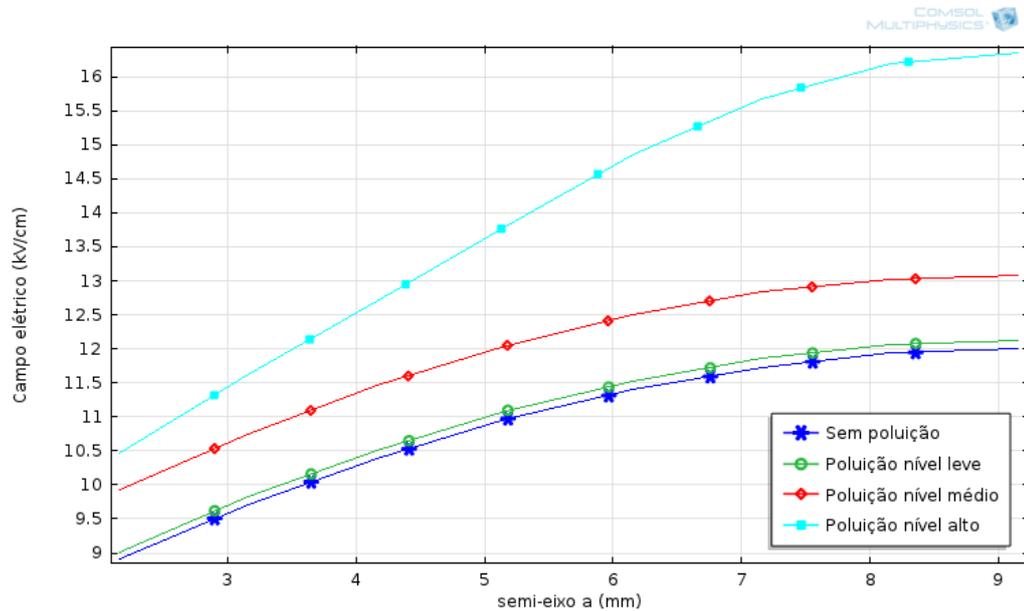
#### 4.1.2.2 *Variação da tensão aplicada no isolador*

Nesta simulação mantém-se a geometria da cavidade constante, porém a tensão aplicada no isolador é aumentada a medida que é medido o campo elétrico interno na cavidade. Para essa simulação também são considerados os níveis de poluição.

Os casos de variação da poluição depositada quando o isolador está submetido a uma tensão de 1 pu já foram verificados na Figura 56. Na Figura 59 têm-se a mesma variação da poluição, porém, neste caso o isolador está submetido a uma tensão de 3 pu.

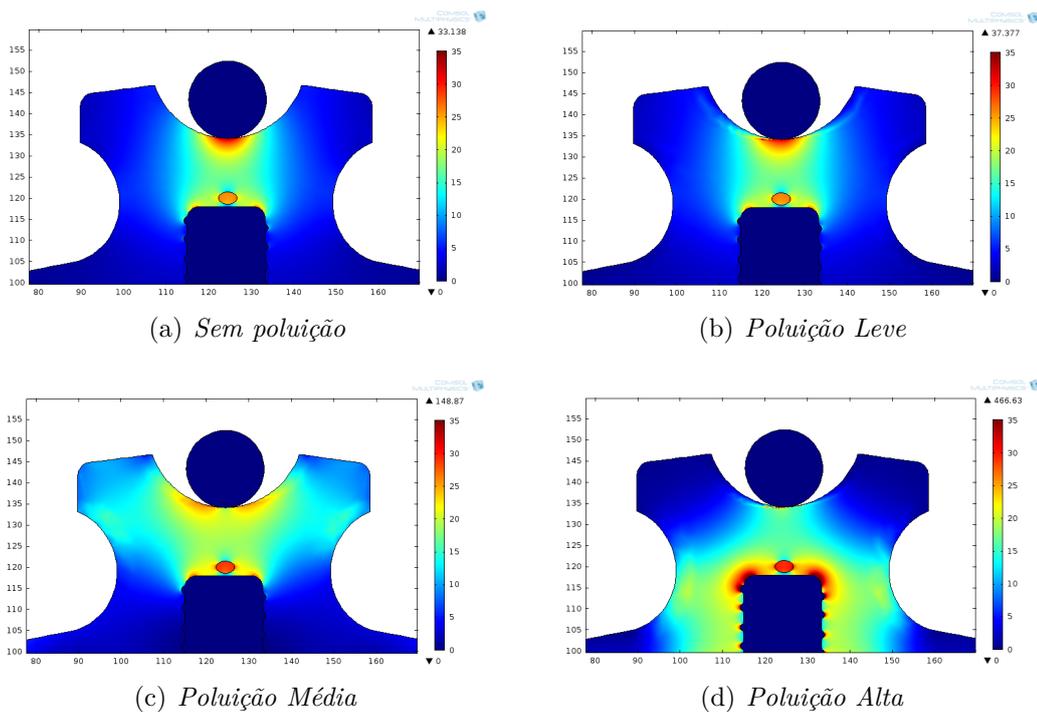
No gráfico da figura 60 pode-se observar a variação do campo elétrico máximo no interior da cavidade em função da variação da tensão aplicada no condutor. Pode-se verificar que o aumento da poluição causa um aumento no nível de campo elétrico encontrado dentro da cavidade, o inverso do ocorrido quando a cavidade estava na parte superior do isolador, devido a posição da cavidade, que está situada em uma região do isolador onde o campo elétrico se intensifica com o aumento da poluição.

Figura 58 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo  $a$  da cavidade posicionada próxima à ferragem aterrada - isolador de classe 15 kV.



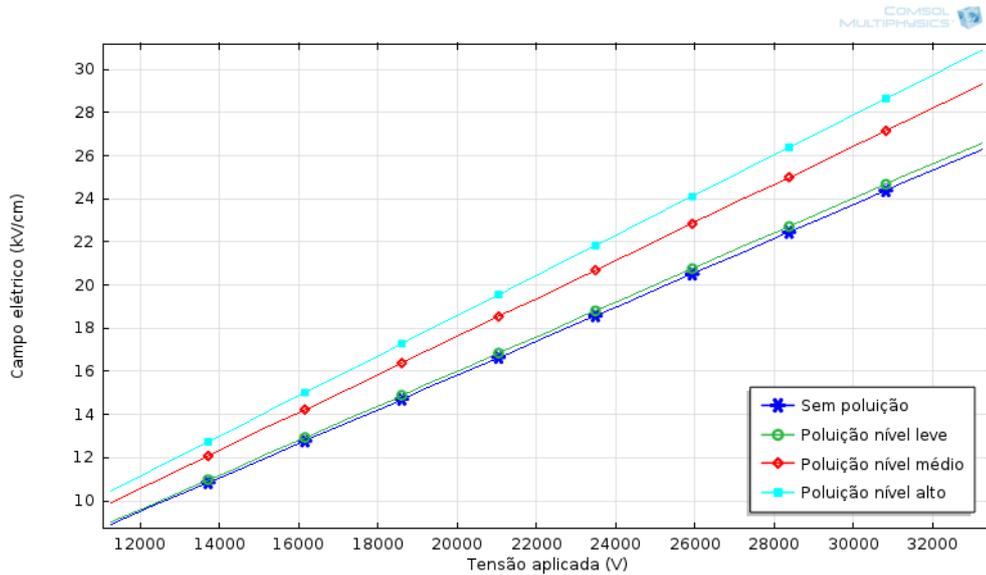
Fonte: próprio autor.

Figura 59 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor.

Figura 60 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV.

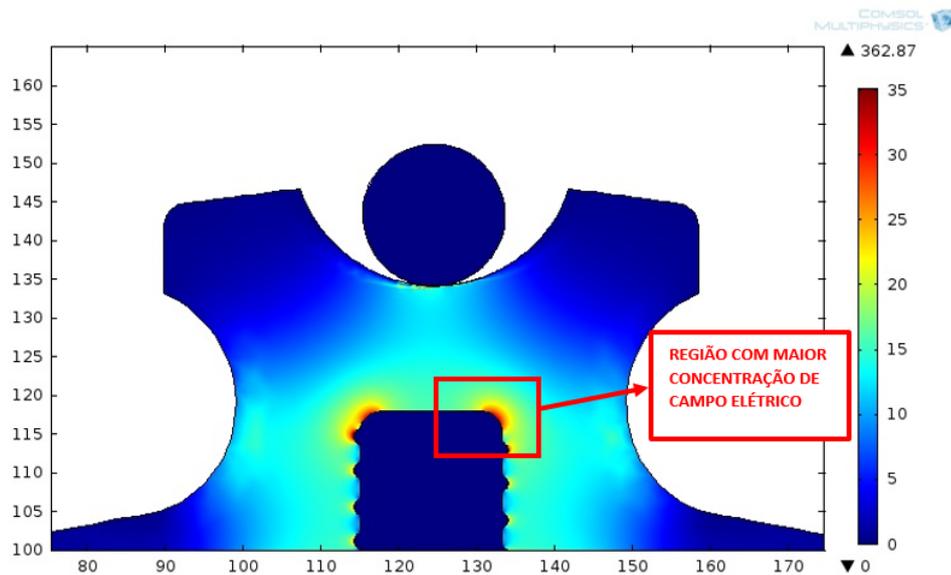


Fonte: próprio autor

#### 4.1.3 Cavidade em região com maior concentração de campo elétrico

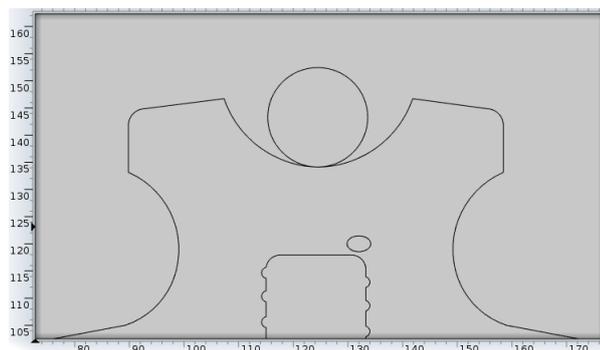
Como pode ser verificado nas simulações anteriores, a região destacada na Figura 61, apresenta uma maior concentração de campo elétrico. Devido a isso considerou-se estudar as consequências de uma cavidade interna nas proximidades dessa região. Ver Figura 62.

Figura 61 – Concentração de campo elétrico em região próxima à ferragem aterrada



Fonte: próprio autor.

Figura 62 – Cavidade posicionada em região de alta concentração de campo



Fonte: próprio autor.

Este caso segue o mesmo princípio que as simulações anteriores em que foram utilizadas as simulações da variação da geometria e variação da tensão aplicada no isolador.

#### 4.1.3.1 *Variação da geometria da cavidade*

Estão ilustrados nas Figuras 63, 64 e 65, os casos de variação da geometria, com o crescimento do semi-eixo  $a$  da cavidade de 2,16 mm para 9,16 mm.

Conforme verificado em outras simulações, percebe-se pelo gráfico da Figura 65 que devido a cavidade estar posicionada próxima à ferragem aterrada, ela é bastante influenciada pela poluição no isolador.

#### 4.1.3.2 *Variação da tensão aplicada ao isolador*

Os casos de variação da poluição depositada quando o isolador está submetido a uma tensão de 1 pu já foram verificados na Figura 63. Na Figura 66 têm-se a mesma variação da poluição, porém, neste caso o isolador está submetido a uma tensão de 3 pu.

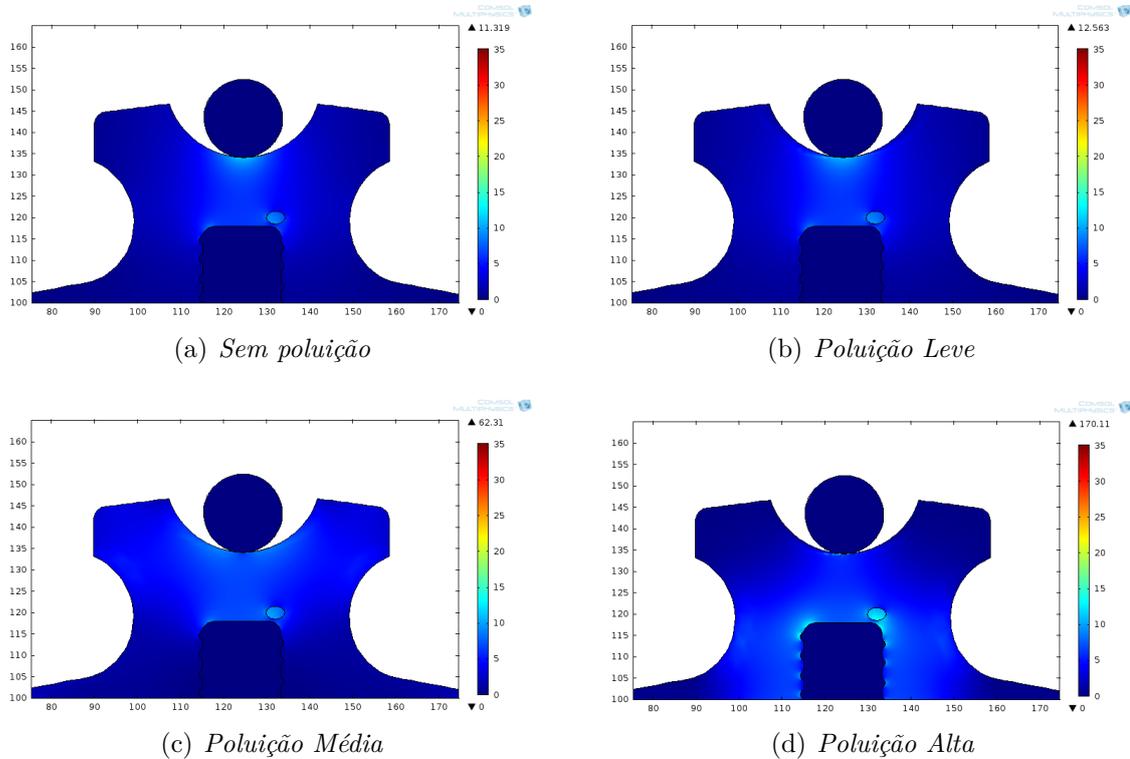
No gráfico da Figura 67 verifica-se que os valores da intensidade do campo elétrico no interior da cavidade atingem valores mais elevados que os obtidos nas simulações anteriores, revelando a maior criticidade de uma cavidade nessa posição e da maior influência da variação da tensão em relação a variação da geometria para este caso.

Após a obtenção dos dados de simulação, pode ser feita uma análise utilizando a lei de Paschen para determinar a possibilidade ou não de ocorrência de descargas parciais para os casos estudados até agora.

#### 4.1.4 *Rachadura no material polimérico*

Uma das possibilidades de falha em isoladores de pino poliméricos é decorrente de rachaduras ou fendas causadas por algum tipo de estresse mecânico. Uma região propícia

Figura 63 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor.

para esse tipo de falha é a região próxima ao pino de fixação, conforme está representado na Figura 68

Realizando-se uma verificação da influência da variação da tensão aplicada ao isolador na rachadura presente no mesmo, percebe-se também a influência da poluição no campo elétrico em seu interior, conforme pode ser visto nas Figuras 69 e 70.

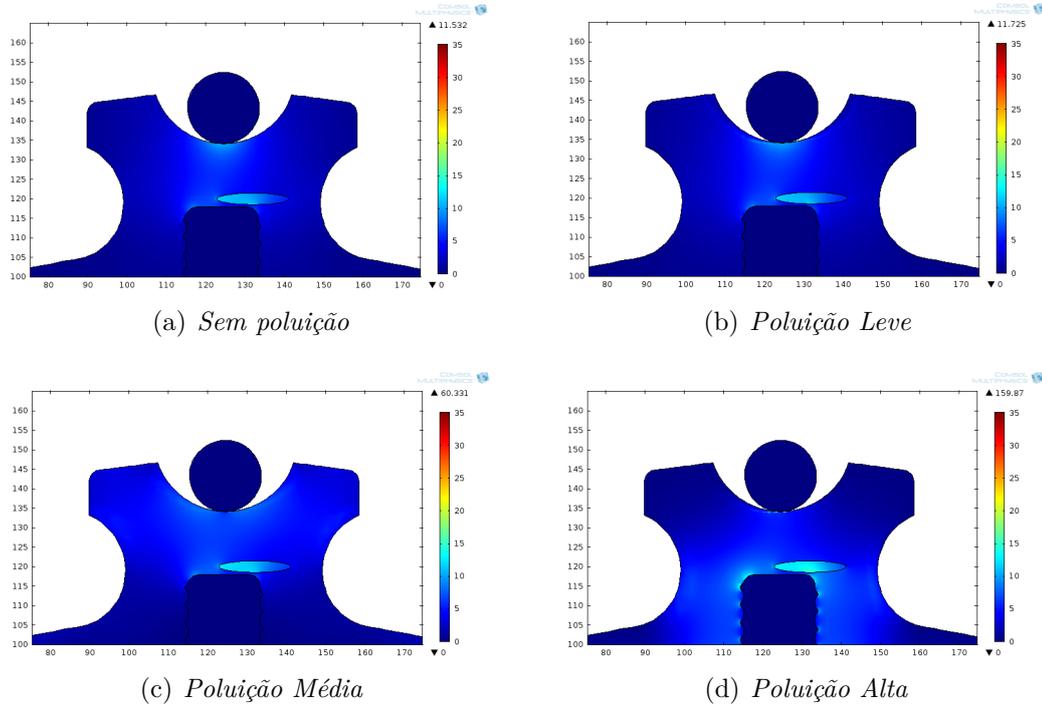
No gráfico da Figura 71 nota-se que este caso apresenta uma maior criticidade que os casos anteriormente estudados, devido aos níveis de campo elétrico mais elevados no interior da rachadura.

#### 4.1.5 Surgimento das DPs no isolador de pino classe 15 kV

Para detectar a ocorrência ou não de descargas parciais internas, é possível utilizar a equação 2.26 para encontrar o valor de  $V_d/d$ , que seria o campo elétrico necessário para o surgimento de uma descarga no interior da cavidade, chamado aqui de  $E_d$  [kV/cm].

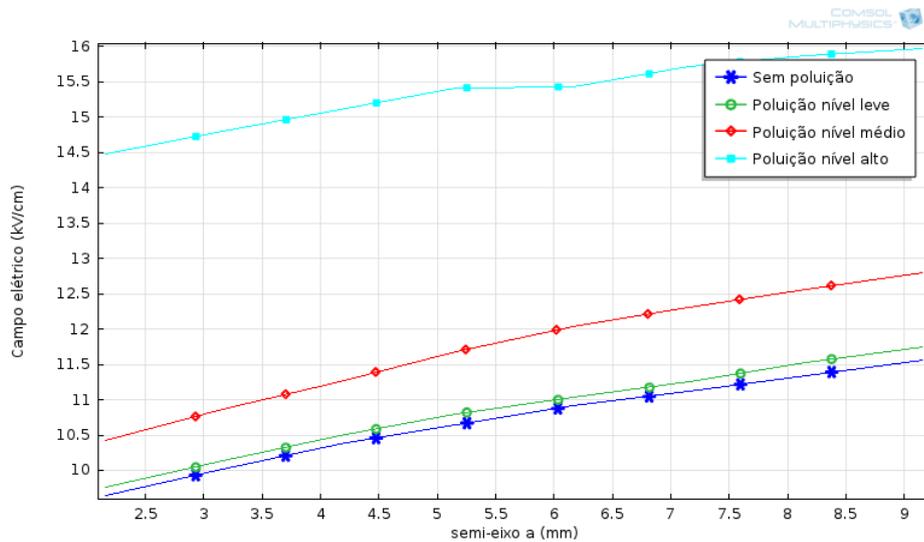
$$E_d = \frac{V_d}{d} = 6,72\sqrt{\frac{p}{d}} + 24,36(p) \text{ [kV/cm]} \quad (4.1)$$

Figura 64 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 9,16$  mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.



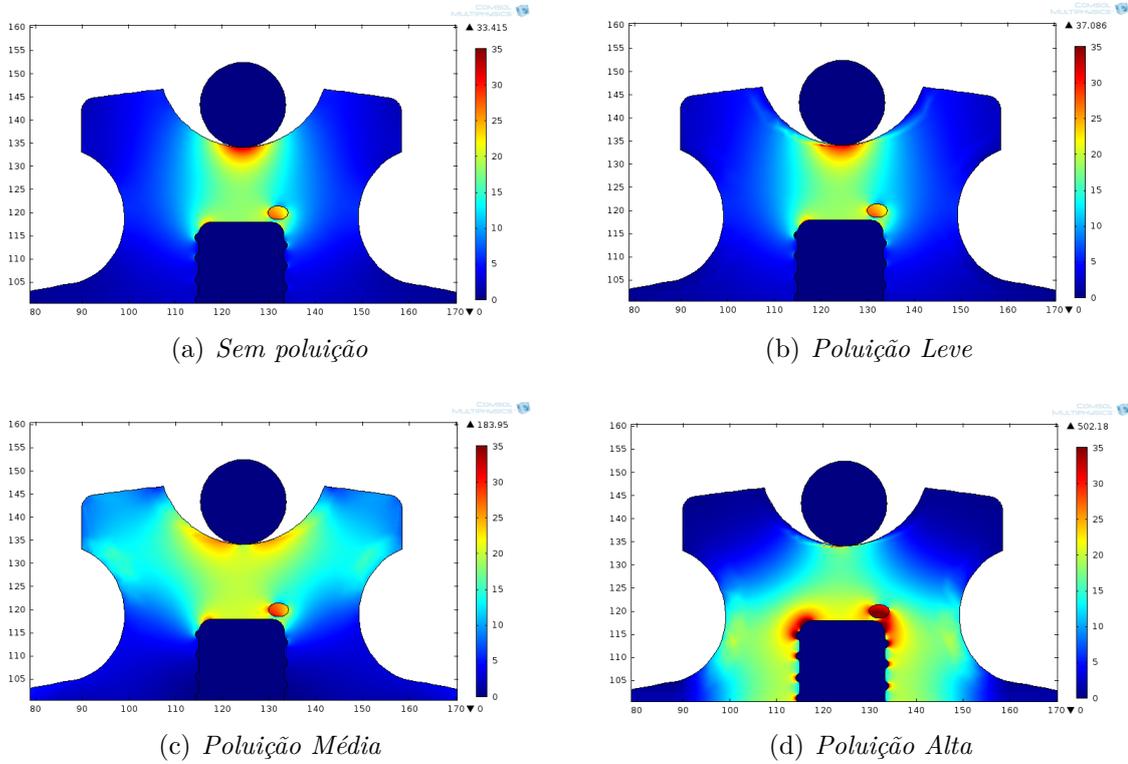
Fonte: próprio autor.

Figura 65 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo  $a$  da cavidade posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada - isolador de classe 15 kV.



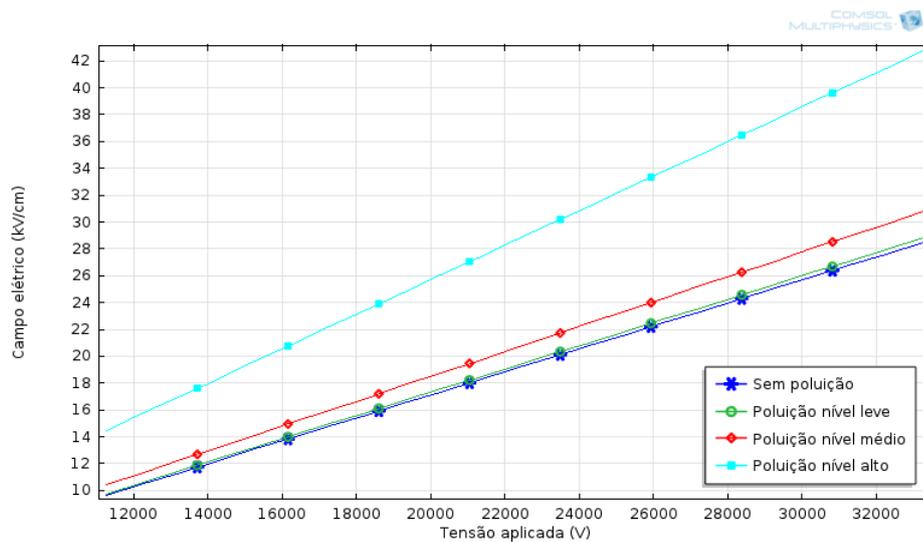
Fonte: próprio autor.

Figura 66 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.



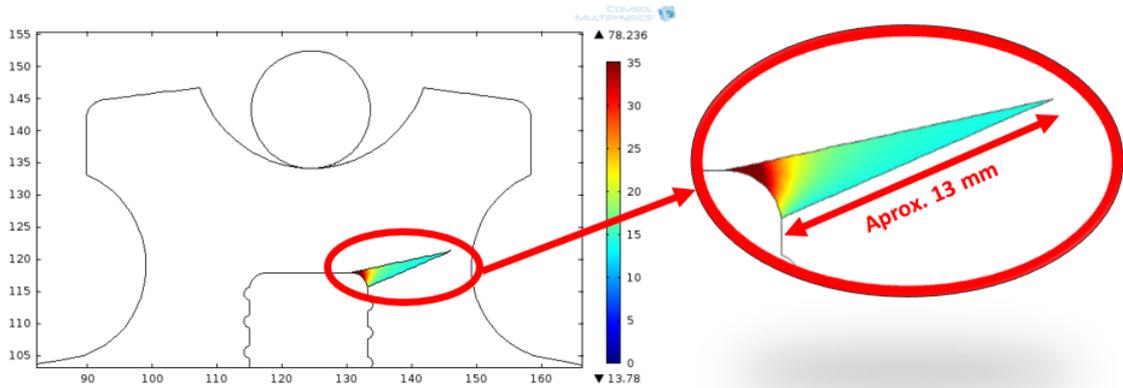
Fonte: próprio autor.

Figura 67 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV.



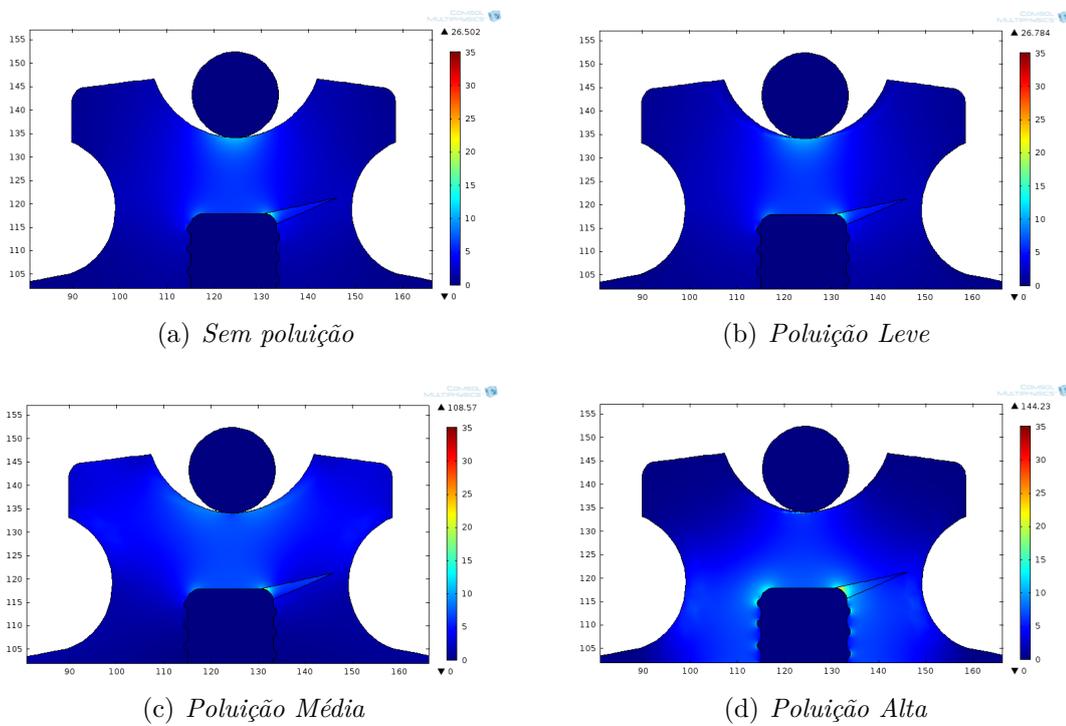
Fonte: próprio autor.

Figura 68 – Cavidade no material polimérico devido a estresse mecânico.



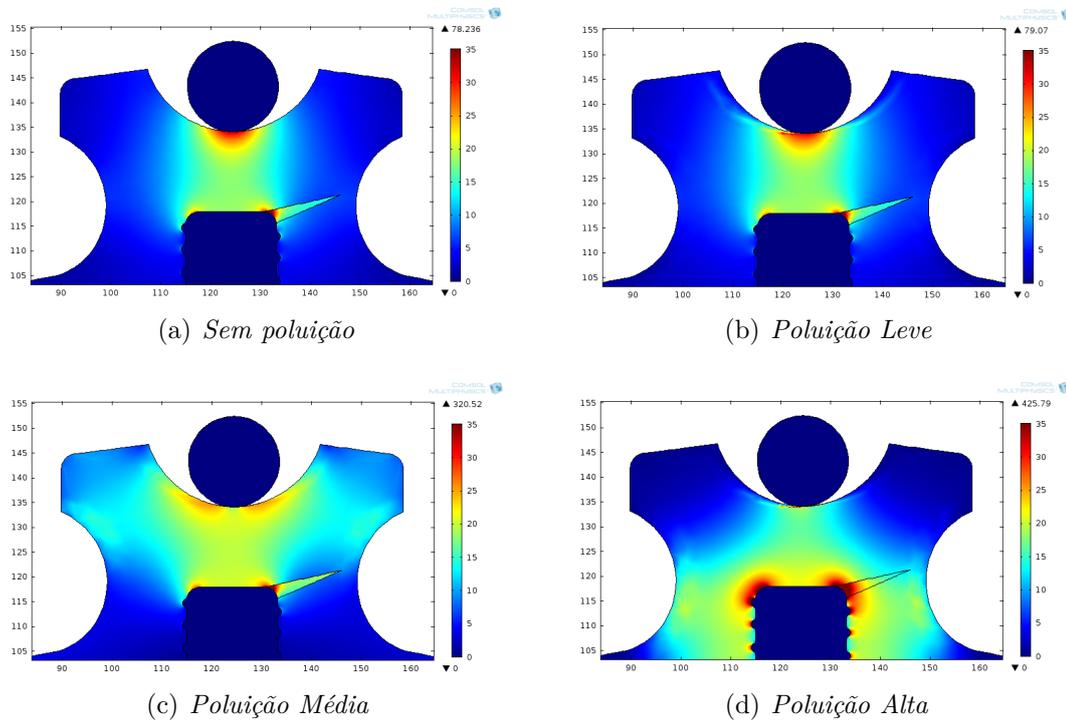
Fonte: próprio autor.

Figura 69 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 11,27 kV (1 pu) - rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.



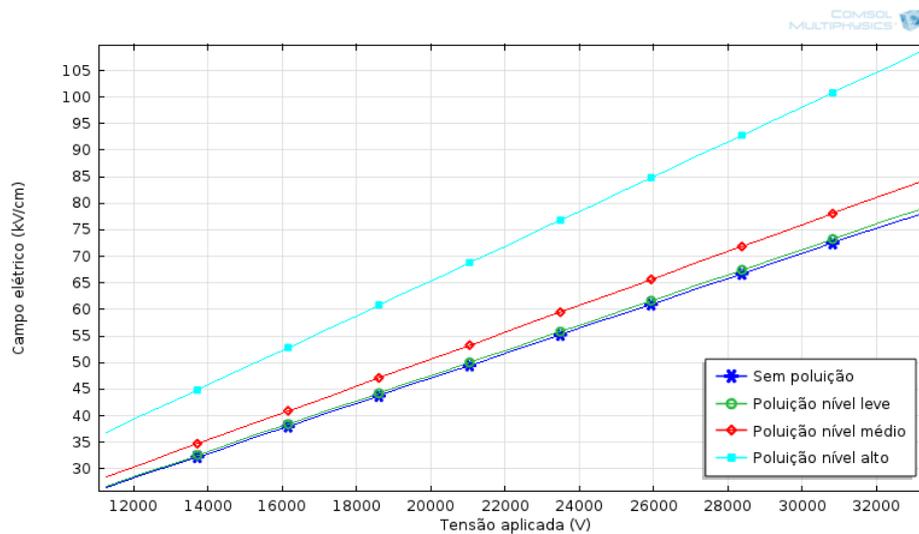
Fonte: próprio autor.

Figura 70 – Campo elétrico no isolador de classe 15 kV, tensão aplicada de 33,80 kV (3 pu) - rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor.

Figura 71 – Variação do campo elétrico na rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada em função da variação de tensão no isolador de classe 15 kV.



Fonte: próprio autor.

Considerando que o valor de  $d$  é igual a duas vezes o semi-eixo  $b$  da cavidade, temos que  $d = 2 \times 0,146 \text{ cm} = 0,292 \text{ cm}$ , e que a pressão no interior da cavidade continua sendo a pressão atmosférica,  $p = 1 \text{ bar}$ , encontra-se  $E_d = 36,80 \text{ kV/cm}$

Utilizando o valor encontrado através da lei de Paschen, pode-se concluir que apenas as simulações demonstradas nas seções 4.1.1.2 e 4.1.3.2 atingiram valores iguais ou superiores ao necessário para o surgimento de descargas parciais internas. A Tabela 9 e Tabela 10 demonstram os valores de tensão e o nível de poluição a que o isolador necessitaria estar submetido para que ocorra a primeira ruptura do dielétrico no interior da cavidade.

Tabela 9 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com cavidade de semi-eixo  $a = 2,16 \text{ mm}$  posicionada próxima ao condutor.

<b>Nível de Poluição</b>	<b>Tensão de início das DPs</b>
Sem Poluição	31,30 kV (2,78 pu)
Poluição nível leve	33,27 kV (2,95 pu)
Poluição nível médio	Não houve
Poluição nível alto	Não houve

Fonte: próprio autor.

Tabela 10 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com cavidade de semi-eixo  $a = 2,16 \text{ mm}$  posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.

<b>Nível de Poluição</b>	<b>Tensão de início das DPs</b>
Sem Poluição	Não houve
Poluição nível leve	Não houve
Poluição nível médio	Não houve
Poluição nível alto	29,27 kV (2,59 pu)

Fonte: próprio autor.

Percebe-se que a cavidade próxima à aresta do pino e o isolador apresentando o nível de poluição alto demonstrou ser mais prejudicial, pois permite que com um nível de tensão de 2,59 pu seja possível a ocorrência de descargas parciais internas.

Para nível de comparação, se for considerado que a descarga na rachadura ocorre no mesmo nível de tensão calculado para as cavidades anteriores podemos definir os valores da Tabela 11 para ocorrência de descargas parciais na rachadura.

Tabela 11 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com rachadura posicionada próxima à aresta da ferragem aterrada.

Nível de Poluição	Tensão de início das DPs
Sem Poluição	15,27 kV (1,35 pu)
Poluição nível leve	15,27 kV (1,35 pu)
Poluição nível médio	14,27 kV (1,27 pu)
Poluição nível alto	11,27 kV (1,00 pu)

Fonte: próprio autor.

## 4.2 Isolador polimérico de suspensão classe 245 kV

A fim de estender a análise da ocorrência de descargas parciais a isoladores com maiores níveis de tensão, utilizou-se aqui um modelo de isolador de suspensão aplicado em linhas de transmissão de 230 kV. Seguindo as mesmas etapas de análises, com variação da geometria da cavidade e variação da tensão aplicada no isolador.

### 4.2.1 Cavidade próxima à ferragem da fase

#### 4.2.1.1 *Variação da geometria da cavidade*

Nesta simulação utiliza-se o mesmo modelo de cavidade utilizada nas simulações anteriores, com suas dimensões mínimas ( $a = 2,16$  mm e  $b = 1,46$  mm) e máximas ( $a = 9,16$  mm e  $b = 1,46$  mm). A cavidade é preenchida por ar atmosférico na pressão de 1 bar. A tensão aplicada no isolador neste caso é a tensão fase terra valor de pico, ou seja, 187,79 kV, 1 pu.

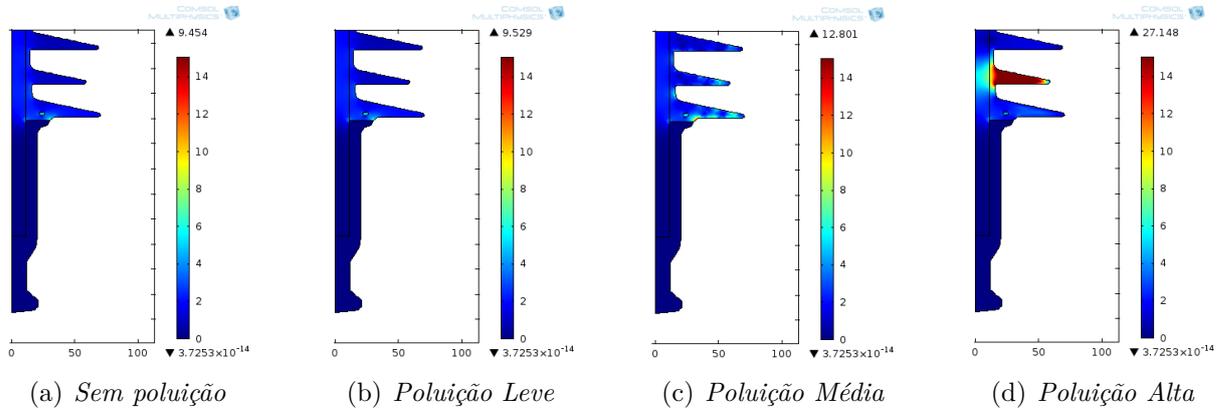
Na Figura 72 estão demonstrados os casos com vários níveis de poluição estando a cavidade em suas dimensões mínimas. De forma semelhante na Figura 73 apresenta-se a mesma avaliação, porém considerando as dimensões máximas da cavidade.

Utilizando-se o gráfico da Figura 74 é possível verificar que a partir de determinada dimensão do semi-eixo  $a$ , entre 7 mm e 7,5 mm, a poluição de nível elevado tem uma grande influência no campo elétrico interno à cavidade, pois a mesma começa a situar-se em uma região de alta concentração de campo elétrico devido a poluição.

#### 4.2.1.2 *Variação da tensão aplicada no isolador*

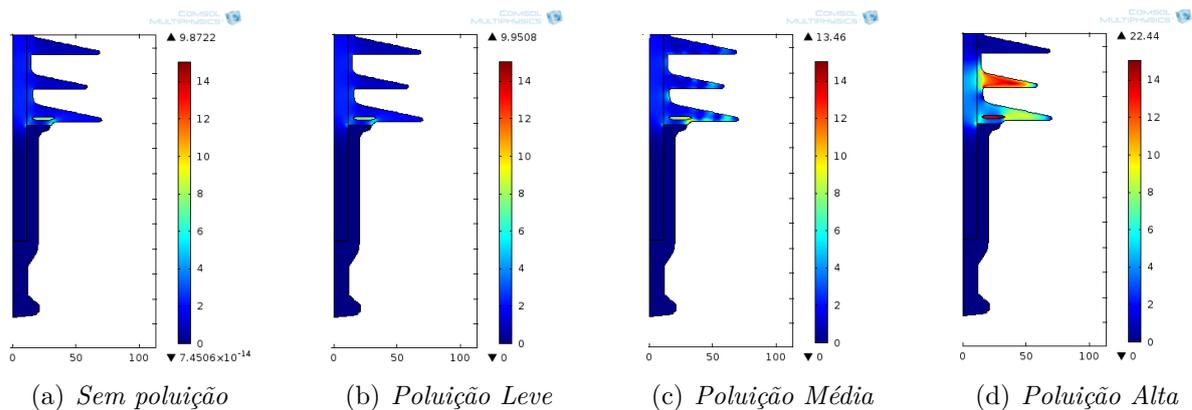
Da mesma forma que nas simulações anteriores, considera-se também o caso em que a geometria da cavidade não varia e a tensão aplicada fase-terra, valor de pico no isolador aumenta da tensão nominal, 1 pu, até o valor de 3 pu, ou seja, nessa simulação

Figura 72 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo a = 2,16 mm posicionada próxima à ferragem da fase.



Fonte: próprio autor

Figura 73 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo a = 9,16 mm posicionada próxima à ferragem da fase.



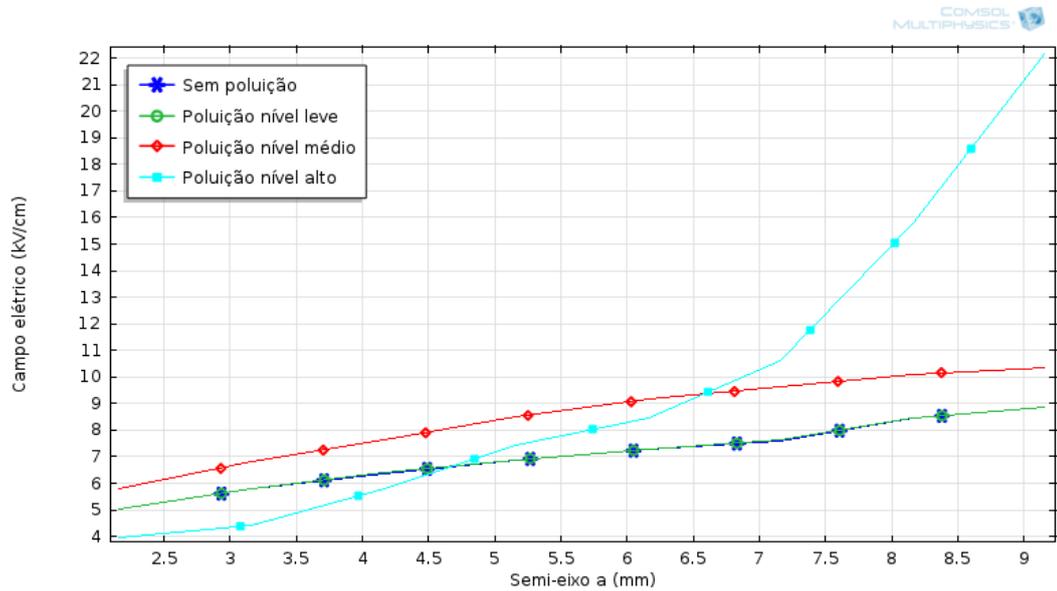
Fonte: próprio autor

o isolador será submetido a níveis de tensão compreendidos entre  $230\text{kV} \times (\sqrt{2}/\sqrt{3}) = 187,79 \text{ kV}$  e  $(3 \times 230\text{kV}) \times (\sqrt{2}/\sqrt{3}) = 563,38 \text{ kV}$ .

Os casos de variação da poluição depositada quando o isolador está submetido a uma tensão de 1 pu já foram verificados na Figura 72. Na Figura 75 têm-se a mesma variação da poluição, porém, neste caso o isolador está submetido a uma tensão de 3 pu.

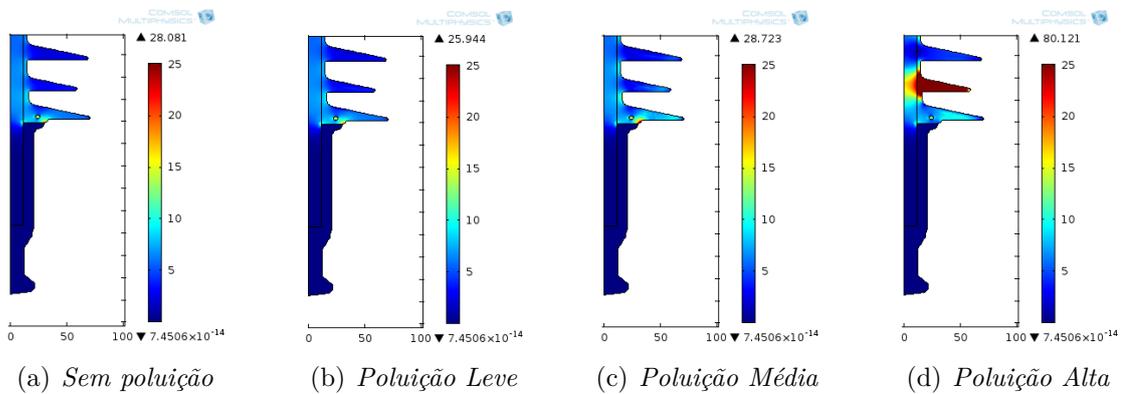
No gráfico da Figura 76 está ilustrada a variação do campo elétrico em função da variação da tensão aplicada ao isolador polimérico. Nota-se que os níveis de campo elétrico no interior da cavidade com nível elevado de poluição são menores que os valores de campo elétrico na cavidade do isolador sem poluição. Isso não indica que o isolador está sob menor estresse, pois pode ser observado na Figura 75 que o isolador está submetido a

Figura 74 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo  $a$  da cavidade posicionada próxima à ferragem da fase - isolador de classe 245 kV.



Fonte: próprio autor

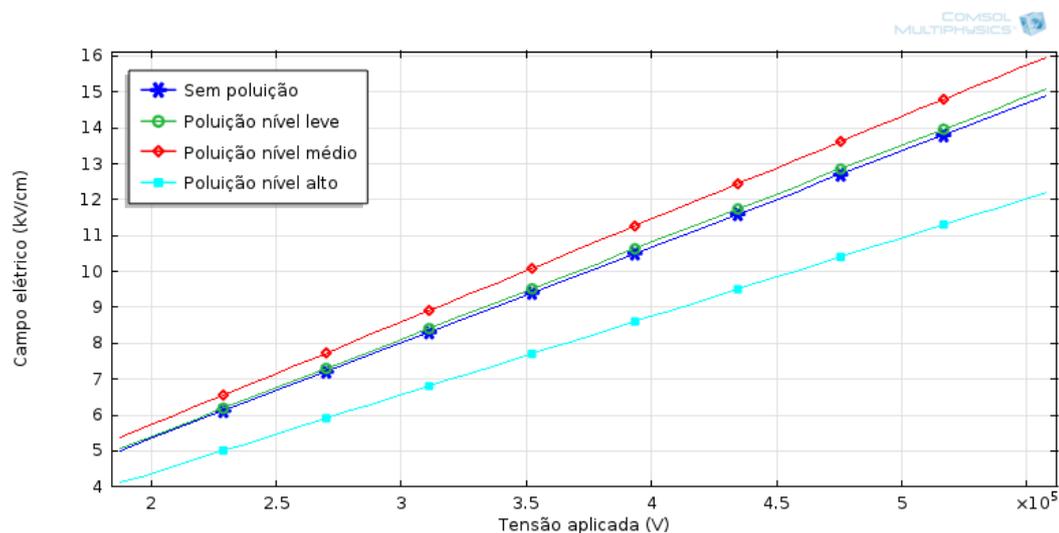
Figura 75 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 563,38 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem da fase.



Fonte: próprio autor

um nível maior de campo elétrico, porém esse campo está concentrado em outras regiões, que não são próximas a cavidade.

Figura 76 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem da fase, em função da variação de tensão no isolador de classe 245 kV.



Fonte: próprio autor

## 4.2.2 Cavidade próxima à ferragem aterrada

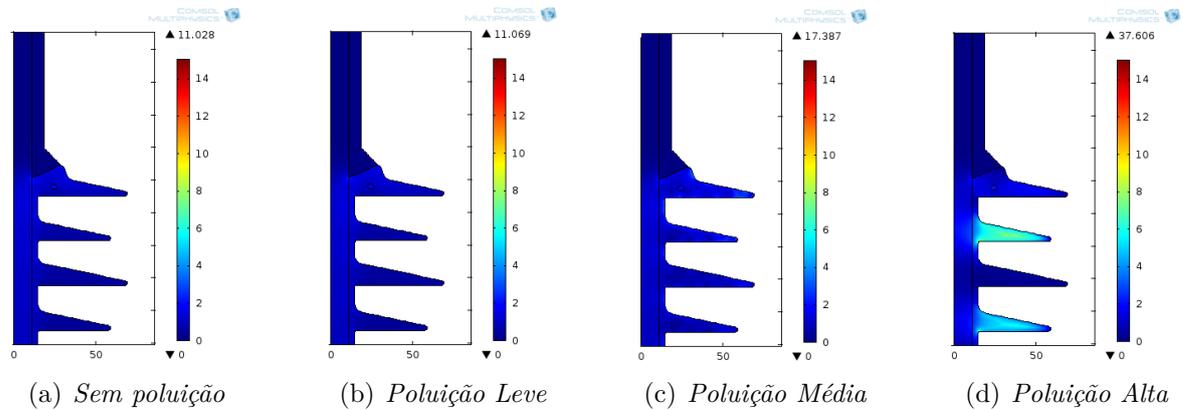
Nesta simulação utilizam-se as mesmas geometrias da cavidade e a mesma variação de tensão das simulações anteriores, porém agora com a cavidade posicionada próxima a ferragem com potencial 0 V, ou seja, que está conectada a torre.

### 4.2.2.1 Variação da geometria da cavidade

Seguindo o que já foi definido anteriormente, a cavidade utilizada é a elipsoidal com semi-eixo  $a = 2,16$  mm e semi-eixo  $b = 1,46$  mm, sendo que a variação da geometria ocorrerá pela variação do semi-eixo  $a$  de 2,16 mm até 9,16 mm mantendo-se a tensão aplicada no isolador como sendo a tensão nominal fase-terra em seu valor de pico, ou seja, 187,79 kV, 1 pu. Os resultados são ilustrados nas Figuras 77 e 78.

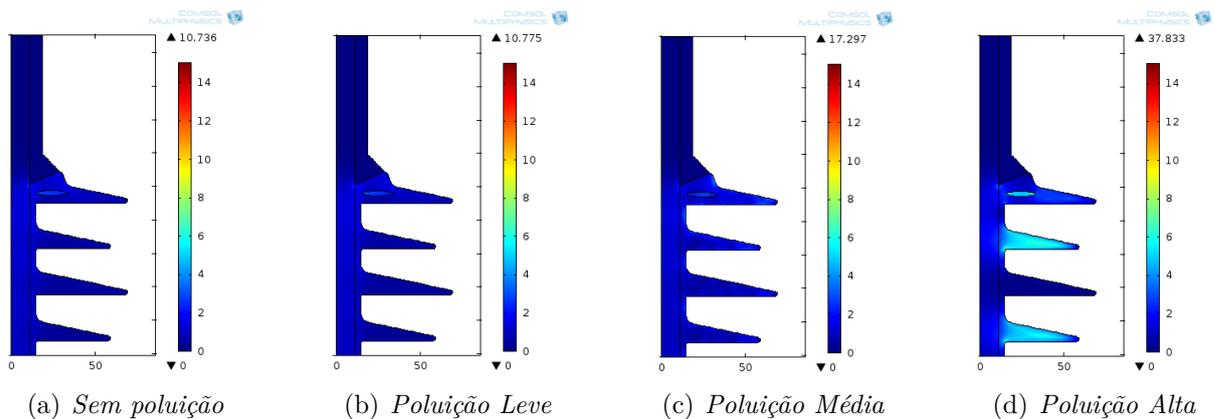
No gráfico da Figura 79 estão apresentados os resultados da variação do campo elétrico no interior da cavidade em função da geometria da mesma. Nota-se uma grande variação no campo elétrico no interior da cavidade quando o isolador está submetido a um elevado nível de poluição.

Figura 77 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor

Figura 78 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 187,79 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 9,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor

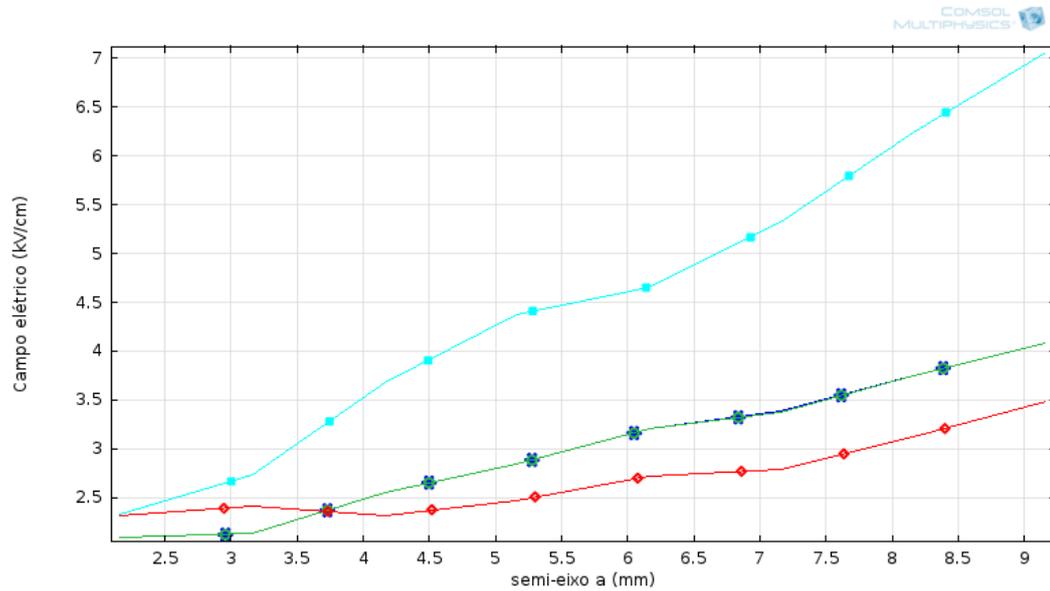
#### 4.2.2.2 Variação da tensão aplicada no isolador

Da mesma forma que na simulação da cavidade próxima a fase, para este caso a tensão aplicada ao isolador terão os mesmos valores, partindo de 1 pu = 187,79 kV até atingir o valor de 3 pu = 563,37 kV.

Os casos de variação da poluição depositada quando o isolador está submetido a uma tensão de 1 pu já foram verificados na Figura 77. Na Figura 80 têm-se a mesma variação da poluição, porém, neste caso o isolador está submetido a uma tensão de 3 pu.

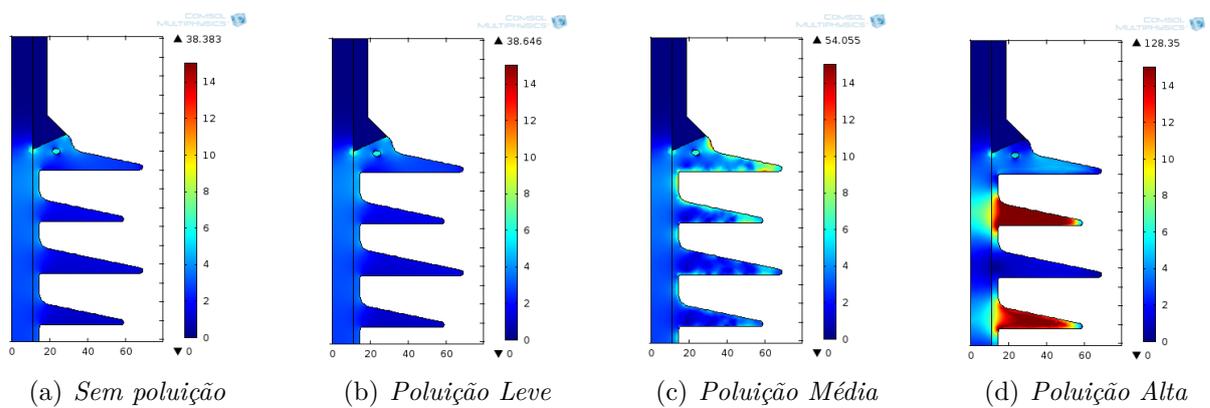
Analisando-se o gráfico da Figura 81 pode ser concluído que para esse caso de análise a cavidade não apresenta nível de campo elétrico suficiente para que ocorra uma descarga interna.

Figura 79 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo  $a$  da cavidade posicionada próxima à ferragem aterrada - isolador de classe 245 kV.



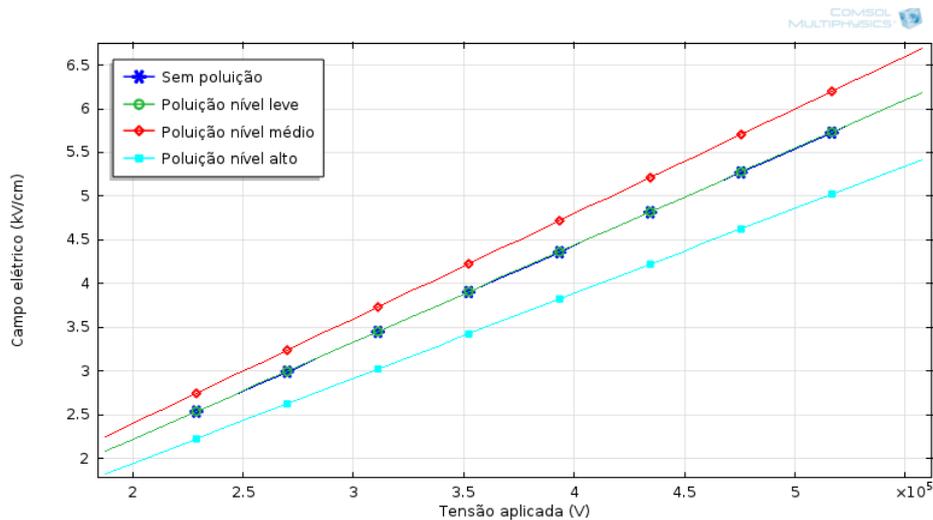
Fonte: próprio autor

Figura 80 – Campo elétrico no isolador de classe 245 kV, tensão aplicada de 563,38 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor

Figura 81 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada, em função da variação de tensão no isolador de classe 245 kV.



Fonte: próprio autor

### 4.3 Isolador polimérico de suspensão classe 550 kV

Outro caso avaliado neste trabalho é o do isolador polimérico de suspensão utilizado em linhas de transmissão de 500 kV. Considerando a mesma metodologia de análise, o mesmo modelo de cavidade com semi-eixo  $a$  variando de 2,16 mm a 9,16 mm e variando-se a tensão no isolador também entre 1 pu e 3 pu, que neste caso tornam-se iguais a 500 kV  $\times (\sqrt{2}/\sqrt{3}) = 408,25$  kV e  $(3 \times 500 \text{ kV}) \times (\sqrt{2}/\sqrt{3}) = 1.224,75$  kV, respectivamente.

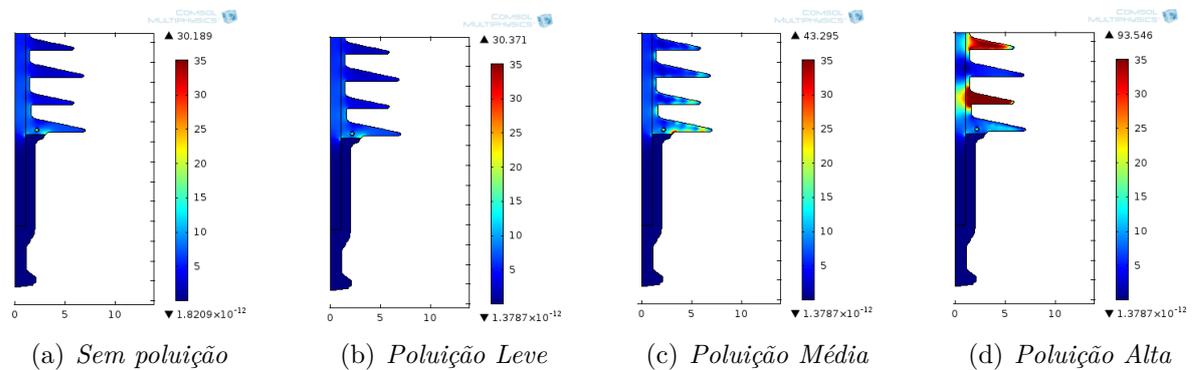
#### 4.3.1 Cavidade próxima a fase

##### 4.3.1.1 Variação da geometria da cavidade

Seguindo o procedimento das simulações nos outros isoladores, a cavidade utilizada é a elipsoidal com semi-eixo  $a = 2,16$  mm e semi-eixo  $b = 1,46$  mm, sendo que a variação da geometria ocorrerá pela variação do semi-eixo  $a$  de 2,16 mm até 9,16 mm mantendo-se a tensão aplicada no isolador como sendo a tensão nominal, ou seja, 408,25 kV. Os resultados são ilustrados nas Figuras 82, 83.

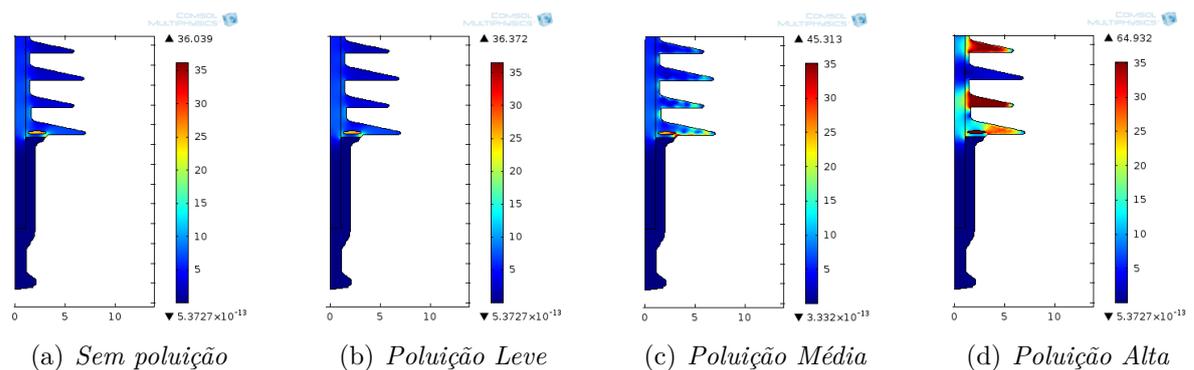
O gráfico da Figura 84 demonstra que a poluição alta tem uma influência mais prejudicial ao isolador quando o semi-eixo  $a$  da cavidade ultrapassa os 6 mm, pois a partir desse momento a cavidade situa-se em uma região de alta concentração de campo elétrico devido a poluição, conforme pode ser verificado na Figura 83.

Figura 82 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem da fase.



Fonte: próprio autor

Figura 83 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 9,16$  mm posicionada próxima à ferragem da fase.



Fonte: próprio autor

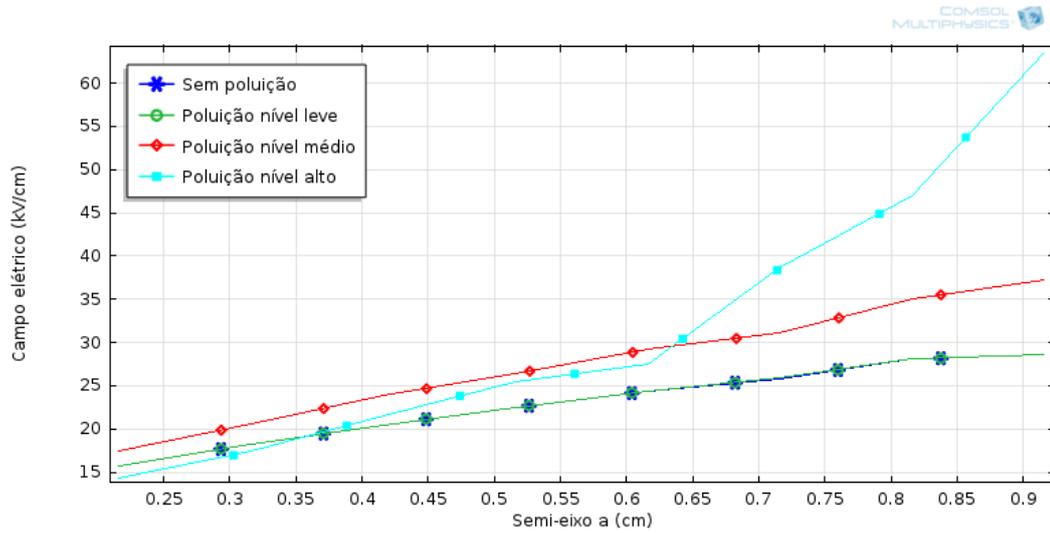
#### 4.3.1.2 Variação da tensão aplicada no isolador

Mais uma vez, para esta simulação, mantém-se a geometria da cavidade constante com semi-eixo  $a$  de 2,16 mm e a tensão aplicada ao isolador de suspensão irá variar de 1 pu =  $500 \times (\sqrt{2}/\sqrt{3}) = 408,25$  kV até a tensão de 3 pu =  $(3 \times 500) \times (\sqrt{2}/\sqrt{3}) = 1224,75$  kV.

Os casos de variação da poluição depositada quando o isolador está submetido a uma tensão de 1 pu já foram verificados na Figura 82. Na Figura 85 têm-se a mesma variação da poluição, porém, neste caso o isolador está submetido a uma tensão de 3 pu.

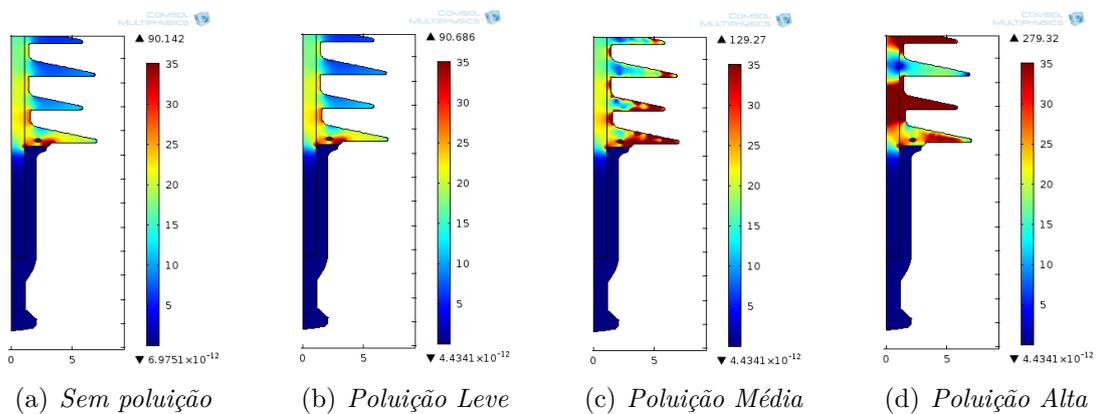
No gráfico da Figura 86 ilustra-se a variação do campo elétrico com a variação da tensão aplicada no isolador. Observa-se que para esta simulação a intensidade do campo elétrico no interior da cavidade atingiu níveis mais elevados, demonstrando ser

Figura 84 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo  $a$  da cavidade posicionada próxima à ferragem da fase - isolador de classe 550 kV.



Fonte: próprio autor

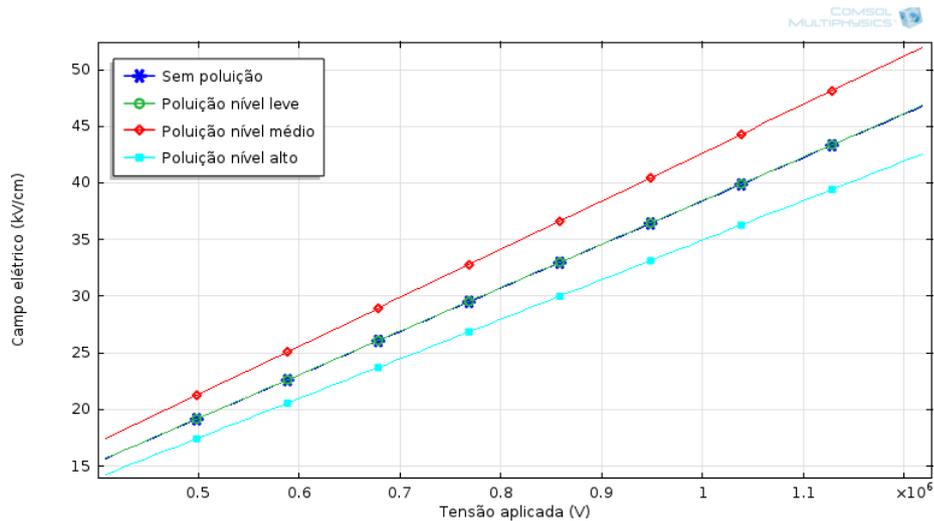
Figura 85 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 1224,75 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem da fase.



Fonte: próprio autor

mais propício a ocorrência de descargas parciais.

Figura 86 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem da fase, em função da variação de tensão no isolador de classe 550 kV.



Fonte: próprio autor

### 4.3.2 Cavidade próxima à ferragem aterrada

Utilizando-se as mesmas geometrias da cavidade e utilizando a mesma variação de tensão dos exemplos anteriores, porém agora com a cavidade posicionada próxima a ferragem com potencial 0 V, ou seja, que está conectada a torre, têm-se os resultados demonstrados a seguir.

#### 4.3.2.1 Variação da geometria da cavidade

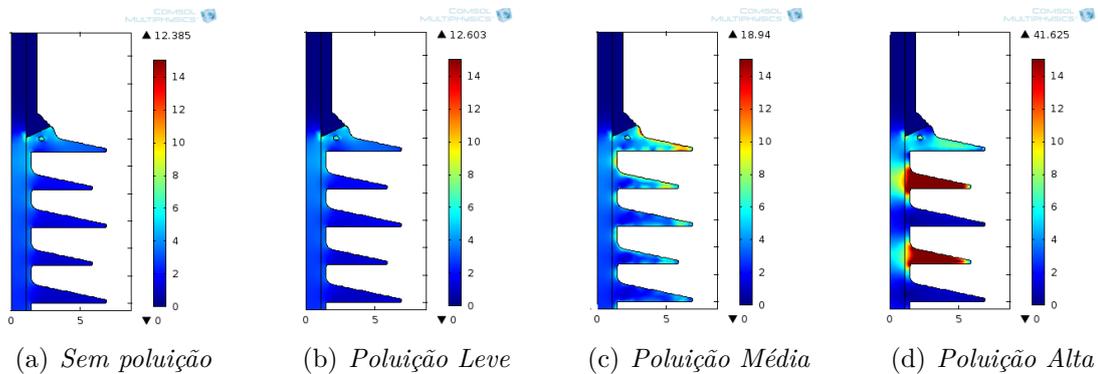
As simulações realizadas com as dimensões mínimas e máximas da cavidade estão ilustradas nas Figuras 87 e 88.

Conforme pode ser visto nas simulações, o gráfico da Figura 89 também demonstra que os níveis de campo elétrico para esta situação estão abaixo do necessário para que tenha início a ocorrência de descargas parciais.

#### 4.3.2.2 Variação da tensão aplicada no isolador

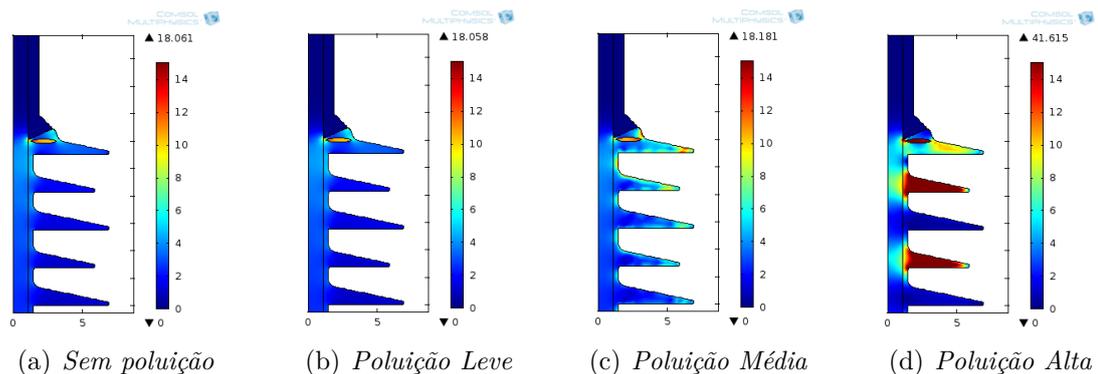
Os valores de tensão aplicados no caso do isolador de 500 kV, assim como no caso da cavidade no lado próximo a fase, variam de 408,25 kV até 1224,75 kV.

Figura 87 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor

Figura 88 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 408,25 kV (1pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 9,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor

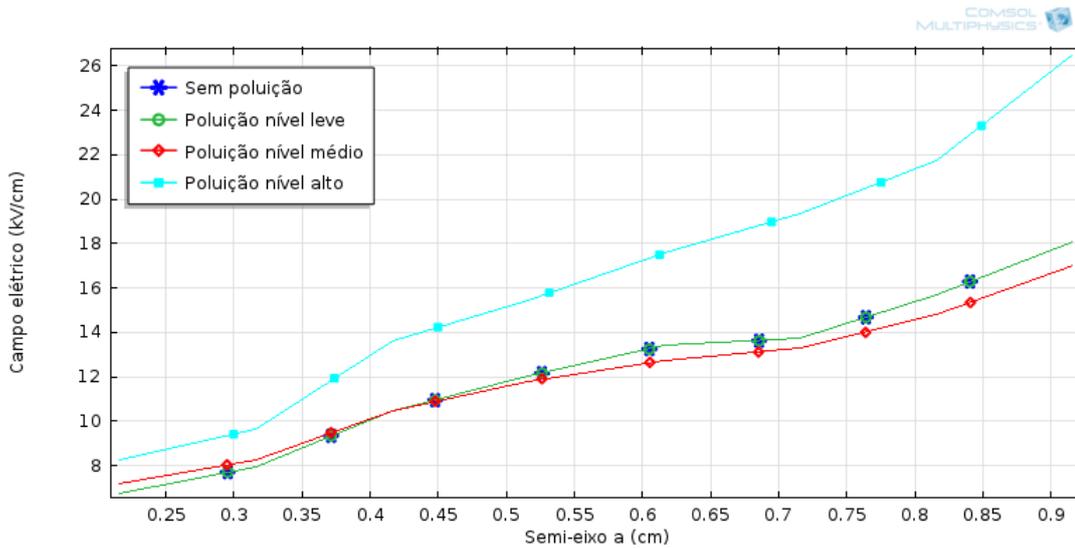
Os casos de variação da poluição depositada quando o isolador está submetido a uma tensão de 1 pu já foram verificados na Figura 87. Na Figura 90 têm-se a mesma variação da poluição, porém, neste caso o isolador está submetido a uma tensão de 3 pu.

O gráfico da Figura 91 demonstra que a posição da cavidade nesta simulação não é crítica ao isolador, uma vez que, mesmo com o nível de tensão em 3 pu, o valor do campo elétrico na cavidade está abaixo do necessário para a ocorrência de descargas parciais, como será visto a seguir.

#### 4.3.3 Surgimento das DPs no isolador de suspensão classe 550 kV

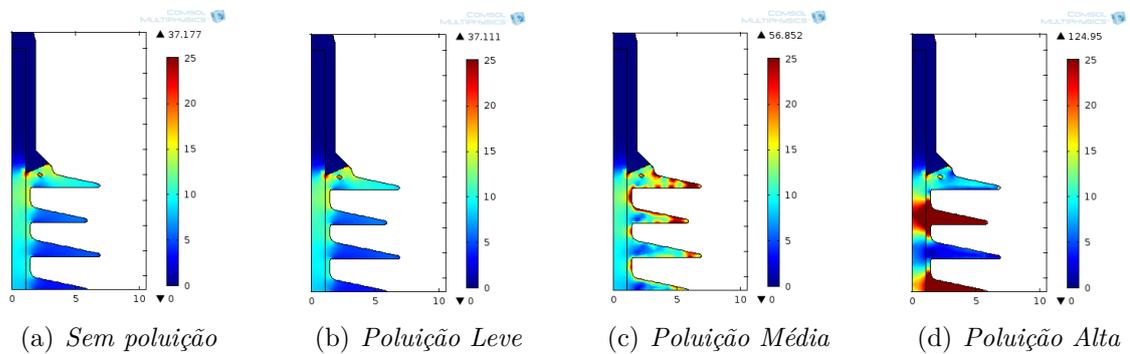
Devido a utilização de um modelo de cavidade com as mesmas dimensões utilizadas nas seções anteriores, pode-se considerar pela Lei de Paschen que o nível de campo elétrico

Figura 89 – Variação do campo elétrico na cavidade em função da variação do semi-eixo  $a$  da cavidade posicionada próxima à ferragem aterrada - isolador de classe 550 kV.



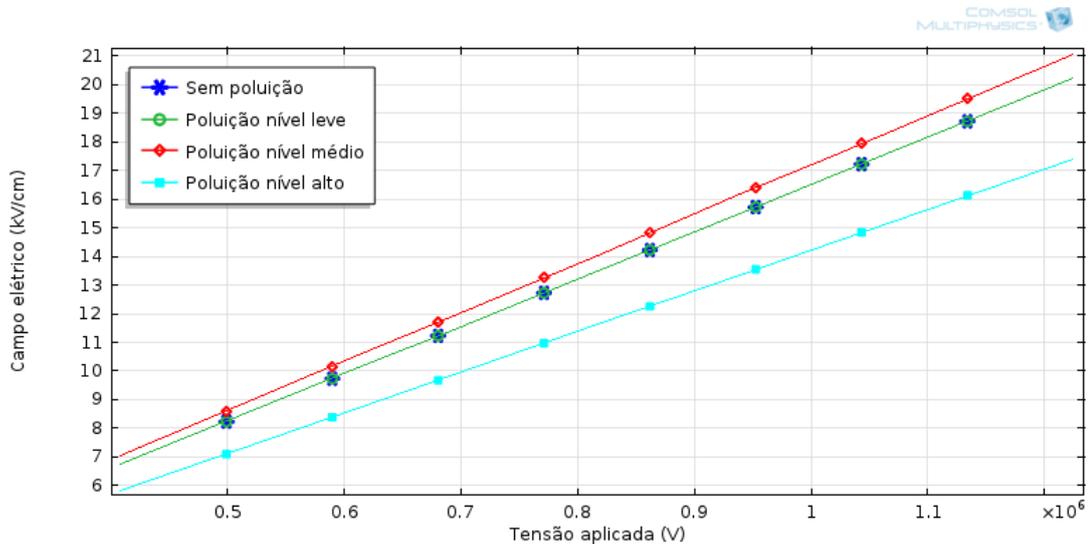
Fonte: próprio autor

Figura 90 – Campo elétrico no isolador de classe 550 kV, tensão aplicada de 1224,75 kV (3 pu) - cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada.



Fonte: próprio autor

Figura 91 – Variação do campo elétrico na cavidade com semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem aterrada, em função da variação de tensão no isolador de classe 550 kV.



Fonte: próprio autor

Tabela 12 – Semi-eixo  $a$  da cavidade para o surgimento de DP's - simulação referente a variação da cavidade posicionada próxima à ferragem da fase no isolador submetido a tensão aplicada de 408,25 kV (1 pu)

Nível de Poluição	Dimensão do semi-eixo $a$ da cavidade
Sem Poluição	Não houve
Poluição nível leve	Não houve
Poluição nível médio	9,16 mm
Poluição nível alto	7,16 mm

Fonte: próprio autor.

necessário para a ocorrência da primeira descarga é o mesmo que o calculado anteriormente, ou seja,  $E_d = 36,80$  kV/cm. Nas simulações com o isolador de 550 kV foram encontradas condições para o surgimento de DP's nos casos em que a cavidade encontra-se próxima à ferragem da fase, dependendo da dimensão da cavidade e da tensão aplicada ao isolador.

Referente a esses dois casos, a Tabela 12 demonstra as dimensões do semi-eixo  $a$  da cavidade em que se iniciam as DP's na mesma quando o isolador está submetido a tensão de 1 pu. Enquanto a Tabela 13 demonstra a tensão aplicada sobre o isolador para que a cavidade em suas dimensões mínimas apresente a ocorrência de DP's.

Tabela 13 – Tensão necessária para o surgimento de DPs - simulação referente a variação da tensão no isolador com cavidade de semi-eixo  $a = 2,16$  mm posicionada próxima à ferragem da fase.

<b>Nível de Poluição</b>	<b>Tensão de início das DPs</b>
Sem Poluição	958,25 kV (2,34 pu)
Poluição nível leve	958,25 kV (2,34 pu)
Poluição nível médio	858,25 kV (2,10 pu)
Poluição nível alto	1058,25 kV (2,59 pu)

Fonte: próprio autor.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram estudados alguns fatores que podem influenciar o surgimento de descargas parciais em cavidades internas ao material isolante de isoladores poliméricos.

Nas simulações realizadas, foram adotadas duas situações na avaliação da criticidade das cavidades internas em isoladores poliméricos, a primeira situação é a avaliação da influência da geometria da cavidade no surgimento das descargas parciais. A outra situação é a influência da tensão aplicada sobre o isolador polimérico no surgimento de descargas parciais em cavidades internas. Todas as simulações foram realizadas considerando os isoladores limpos e com até três níveis de camadas de poluição em sua superfície, onde verificou-se que essa camada de poluição também tem influência no campo elétrico no interior da cavidade.

Mais uma vez foi demonstrado que o software COMSOL Multiphysics é uma poderosa ferramenta para análise de diversas falhas em vários tipos de materiais isolantes. As simulações demonstraram que esse método de análise pode ser replicado em diversos tipos de materiais para avaliação da suportabilidade a estresses elétricos, considerando ou não a presença de falhas tanto em seu interior quanto em sua superfície.

Foram encontradas neste trabalho algumas situações em que os isoladores poliméricos com a presença de cavidades internas podem apresentar descargas parciais em seu interior. Algumas dessas situações foram:

- A poluição no isolador de pino classe 15 kV demonstrou ser uma condição mais crítica quando a cavidade está posicionada próxima ao pino de fixação. Devido a geometria do isolador, essa região apresenta campo elétrico mais elevado e que tende a subir com o aumento da poluição;
- A simulação do isolador com alguma falha devido a um estresse mecânico ou abrasão no momento de montagem do mesmo demonstrou ser uma situação extremamente crítica, provocando condições propícias ao surgimento de descargas parciais mesmo com o isolador submetido a tensão nominal;
- Nos isoladores de suspensão verificou-se que a cavidade posicionada próximo ao terminal fase é mais prejudicial que a cavidade próxima ao terminal terra, no caso do isolador de classe 550 kV foi encontrada geometria da cavidade capaz de gerar descargas parciais mesmo com o isolador em sua tensão nominal quando o isolador está na condição de poluição média e alta.

Nas simulações realizadas neste trabalho, o isolador de classe 245 kV não apresentou

as condições necessárias para a ocorrência de DPs no interior das cavidades internas. Isso não quer dizer que DPs não podem ocorrer neste tipo de isolador, porém, outras condições devem ser investigadas para um entendimento mais completo do comportamento dos isoladores poliméricos.

As simulações realizadas neste trabalho demonstraram o que já havia sido descrito na fundamentação teórica, que a tensão no interior da cavidade é proporcional à tensão aplicada no dielétrico como um todo.

Outra relação demonstrada nas fundamentações teóricas foi a relação do aumento da área da cavidade com o aumento da carga aparente na mesma. Um elevado valor de carga aparente indica a presença de descargas parciais. Isso confirma o ocorrido nas simulações onde foi demonstrado o aumento do campo elétrico no interior da cavidade com o aumento do semi-eixo  $a$  da mesma.

## 5.1 Proposta para trabalhos futuros

Para uma análise mais detalhada do tema de descargas parciais em isolantes poliméricos, são sugeridos os seguintes temas de trabalhos futuros:

- levantamento atual dos principais tipos de falhas ocorridos na fabricação e montagem de isoladores poliméricos a fim de enriquecer os tipos de falhas estudados nas simulações;
- incluir nos modelos simulados, a presença de mais ferragens como anéis anti-corona para determinar sua influência no campo elétrico interno às cavidades posicionadas em locais críticos;
- utilizar modelos tridimensionais para possibilitar o cálculo das capacitâncias dos isoladores e cavidades no COMSOL, e utilizar esses valores em modelos de simulação de medição de descargas parciais;
- investigar o processo posterior a ocorrência da primeira descarga, onde existirá uma variação dos gases internos, pressão do gás no interior da cavidade, carbonização da superfície interna da cavidade e outros fatores que influenciarão descargas posteriores.

## Referências

- BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. *Electromagnetic modeling by finite element methods*. [S.l.]: CRC press, 2003. Citado na página 38.
- BEZERRA, J. et al. Avaliação de sensor de ultra-som como técnica preditiva na manutenção de subestações e linhas de transmissão e distribuição. 2009. Citado na página 22.
- BEZERRA, J. M. d. B. Caracterização de atributos de sinais para utilização de técnicas de reconhecimento de padrões na avaliação do isolamento de instalações e de equipamentos elétricos. *Campina Grande: UFCG*, 2004. Citado na página 25.
- BEZERRA, R. d. C. et al. Estudo para aumento da confiabilidade de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão da eletronorte. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (III.: maio 2010: Belém, Pará). Anais eletrônicos, Belém: UFPA*, 2010. Citado na página 25.
- COSTA, E. et al. Influence of manufacturing imperfections and water drops in the electric field distribution of polymeric insulators. *International Symposium on High Voltage Engineering, 2009*, 2009. Citado na página 47.
- CUENCA, W. M. H. Caracterização dos sinais de descargas parciais em equipamentos de alta tensão a partir de modelos experimentais. *Engineering Department (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, p. 2064–2065, 2005. Citado na página 31.
- FERREIRA, T. Estudo do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos. *M. Sc. Dissertação, Dept. Eng. Elétrica, Univ. Federal de Campina Grande. Campina Grande*, 2007. Citado na página 38.
- GIANELLI, B. F. Caracterização do efeito corona em isoladores poliméricos do tipo bastão submetidos à poluição salínica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008. Citado na página 23.
- HACKAM, R. Outdoor hv composite polymeric insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 6, n. 5, p. 557–585, 1999. Citado na página 23.
- HALL, J. F. History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 376–385, 1993. Citado na página 22.
- KUFFEL JOHN, P. *High voltage engineering fundamentals*. [S.l.]: Newnes, 2000. Citado 6 vezes nas páginas 28, 31, 32, 33, 36 e 37.
- LOPES, D. S. *Modelo de elementos finitos aplicado na avaliação de desempenho de isolantes em ambientes contaminados*. Dissertação (Mestrado) — UFPE, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 45, 53, 55 e 60.
- LUNA, A. M. Materiais de engenharia elétrica. *Recife, CHESF*, v. 19793, 2006. Citado na página 22.

- MARTINS, R. Desenvolvimento de isolador polimérico inteligente. 2015. Citado na página 69.
- MASON, J. Discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, IEEE, n. 4, p. 211–238, 1978. Citado na página 31.
- MORSHUIS, P. H. Partial discharge mechanisms. *Delft University of Technology*, 1993. Citado na página 38.
- MULTIPHYSICS, C. Comsol multiphysics user guide (version 4.3 a). *COMSOL, AB*, 2012. Citado na página 47.
- NBR IEC 60270, A. *NBR IEC 60270: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - Medição de descargas parciais*. [S.l.], 2017. Citado na página 28.
- NERI, M. G. et al. Avaliação de técnicas de monitoramento de isoladores poliméricos. *EPIM*, 2005. Citado na página 26.
- NEVES, W. Materiais elétricos. *Campina Grande: UFCG*, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 33.
- PINHEIRO, W. *A corrente de fuga como parâmetro indicativo do estado de degradação de materiais poliméricos de rede compacta de média tensão, instalados em ambientes agressivos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 22.
- SADIKU, M. N. *Elementos de Eletromagnetismo. Terceira edição*. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 43.
- SILVA, M. A. B. da. *Estudo do comportamento térmico do para-raios de óxido de zinco com invólucro polimérico utilizando o método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado) — UFCG, 2014. Citado na página 47.
- SILVA, S. H. de Moraes e. *Aplicação de técnicas de elementos finitos para mapeamento de campos elétricos sobre cavidades internas a isoladores poliméricos de 13,8 kV*. Dissertação (Mestrado) — UFPE, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 30, 44, 51, 52, 53 e 57.
- SILVESTER, P. P.; FERRARI, R. L. *Finite elements for electrical engineers*. [S.l.]: Cambridge university press, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 41, 43 e 57.
- SUWANASRI, C. et al. Partial discharge detection in high voltage equipment using high frequency current transducer. *GREATER MEKONG SUBREGION ACADEMIC AND RESEARCH NETWORK*, p. 53, 2013. Citado na página 25.
- TOWNSEND, J. *The theory of ionization of gases by collision*. [S.l.]: Limited, 1910. Citado na página 31.
- USHAKOV, V. Y.; USHAKOV, V. I. *Insulation of high-voltage equipment*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004. Citado na página 25.
- VASSILIADIS, M. G. D.-G. E. Models of partial discharges (pd) in enclosed cavities in solid dielectrics: A study of the relationship of pd magnitudes to the sensitivity of pd detectors and some further comments on insulation lifetime. *Journal of Electrical engineering*, v. 54, n. 5-6, p. 132–135, 2003. Citado na página 26.

VOLAT, C. Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer. In: IEEE. *Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE*. [S.l.], 2013. p. 409–413. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

ZHAO, T.; COMBER, M. G. Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 313–318, 2000. Citado na página 60.