

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**NICOLAY MASSING DEUTSCH**

**DIFERENÇAS ENTRE ISOLADORES DE PORCELANA E POLIMÉRICOS**

**Porto Alegre**

**2016**

NICOLAY MASSING DEUTSCH

DIFERENÇAS ENTRE ISOLADORES DE PORCELANA E POLIMÉRICOS

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2016

NICOLAY MASSING DEUTSCH

DIFERENÇAS ENTRE ISOLADORES DE PORCELANA E POLIMÉRICOS

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

---

Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich - UFRGS \_\_\_\_\_

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gladis Bordin - UFRGS \_\_\_\_\_

Prof. Igor Pasa Wiltuschnig - UFRGS \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho a minha noiva  
Carolina, pelos momentos em que estive  
ausente elaborando este trabalho

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro pela orientação e conhecimento ao trabalho realizado. E pela indicação do assunto do Trabalho.

Aos meus pais Julio Deutsch e Margareth Josane Massing, por sempre incentivarem e investirem em meus estudos.

Ao meu irmão Konrado Massing Deutsch por ser uma fonte inspiradora para os estudos.

A minha noiva Carolina Maciel Chaves pelo apoio e compreensão durante o período de graduação e de elaboração deste trabalho.

O importante não é vencer todos os dias,  
mas lutar sempre

Waldemar Valle Martins

## RESUMO

Isoladores de tensão poliméricos estão sendo implantados cada vez mais em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, em substituição aos tradicionais isoladores de porcelana. Porém, há uma carência de estudos comparativos entre estes tipos. Este trabalho apresenta características e comparações acerca dos materiais cerâmicos, poliméricos e compósitos, bem como comparações entre isoladores de porcelana e poliméricos, onde os isoladores poliméricos, cujos núcleos são formados por compósitos, apresenta massas até 58,88% menores, ao mesmo tempo que apresenta cargas mecânicas nominais até 127,27% maiores, enquanto que estes isoladores podem apresentar defeitos causados pela fabricação ou pelo envelhecimento ou perda da hidrofobicidade. Também, através de um estudo comparativo, este trabalho demonstra que uma linha de transmissão pode apresentar uma redução de até 49,74% no número de torres devido ao fato desta utilizar apenas isoladores poliméricos, em comparação a uma linha de transmissão que utiliza apenas isoladores de porcelana.

Palavras-chave: Isoladores. Porcelana. Polimérico. Linha de transmissão. Diferenças.

## **ABSTRACT**

Polymeric voltage insulators are increasingly being deployed in power distribution and transmission systems, replacing traditional porcelain insulators. However, there is a lack of comparative studies among these types. This study presented characteristics and comparisons about ceramic, polymeric and composite materials, as well as comparisons between porcelain and polymeric insulators, where polymeric insulators, whose cores are composed of composites, presented weight up to 58.88% smaller, at the same time as showed nominal mechanical loads up to 127.27% higher, while these insulators can present defects caused by the manufacture or aging, or loss of hydrophobicity. Also, through a comparative study, this study demonstrated that a transmission line can have up to 49.74% fewer towers due to the fact that it uses only polymer insulators, compared to a transmission line that uses only porcelain insulators.

Keywords: Insulators. Ceramic. Polymeric. Transmission Line. Differences.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Polarização dielétrica. ....	14
Figura 2 - Cadeia polimérica do polietileno. ....	17
Figura 3 - Isolador de porcelana do tipo roldana. ....	23
Figura 4 - Isolador de porcelana do tipo castanha. ....	24
Figura 5 - Isolador de porcelana do tipo pino. ....	24
Figura 6 - Isolador de porcelana do tipo suspensão ou disco. ....	25
Figura 7 - Cadeia de isoladores do tipo suspensão ou disco. ....	25
Figura 8 - Isoladores de disco instalados em estrutura de ancoragem. ....	26
Figura 9 - Isoladores de disco instalados em estrutura de suspensão. ....	26
Figura 10 - Isolador de porcelana pilar. ....	27
Figura 11 - Partes componentes de um isolador polimérico. ....	28
Figura 12 - Isolador polimérico do tipo pilar. ....	29
Figura 13 - Isolador polimérico de suspensão ou ancoragem. ....	29
Figura 14 - Medida da distância de escoamento. ....	30
Figura 15 - Descarga elétrica sobre um isolador. ....	31
Figura 16 - Forma de onda típica de impulso atmosférico. ....	33
Figura 17 - Vandalismo em isoladores de porcelana. ....	37
Figura 18 - Linha com isoladores de porcelana. ....	37
Figura 19 - Linha com isoladores poliméricos. ....	38
Figura 20 - Falha em isolador polimérico. ....	38
Figura 21 - Substituição iônica da fibra de vidro do isolador polimérico. ....	39
Figura 22 - Ângulo de contato da hidrofobicidade. ....	40
Figura 23 - Linha de transmissão hipotética. ....	41
Figura 24 - Decomposição de tensão mecânica sobre o cabo. ....	43
Figura 25 - Valor de flecha. ....	44
Figura 26 - Dados do fabricante do isolador de porcelana modelo 8022804. ....	46
Figura 27 - Dados do fabricante do isolador polimérico modelo FXBW500. ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de resistência superficial ( $\rho S$ ) de alguns materiais perante 70% de umidade relativa.....	16
Tabela 2 - Comparação entre os materiais. ....	19
Tabela 3 - Principais parâmetros de isoladores de porcelana e poliméricos. ....	34
Tabela 4 - Resumo em percentual da Tabela 3.....	35
Tabela 5 - Tensão no isolador.....	45
Tabela 6 - Comparação entre as linhas de transmissão.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CE	Cycloaliphatic Epoxy (Epóxi Cicloalifática)
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
EPDM	Etileno-Propileno-Dieno-Metileno
EVA	Ethylene Vinyl Acetate (Acetato de Vinil-Etileno)
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
IUPAC	International Union for Pure and Applied Chemistry
PRFV	Polímero Reforçado com Fibras de Vidro
PRFC	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono
PTFE	Politetrafluoretileno
RDC	Rede de Distribuição Compacta
SR	Silicone Rubber (Borracha de Silicone)

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2.</b>	<b>MATERIAIS ISOLANTES</b> .....	14
2.1.	ESTRUTURA DA MATÉRIA .....	14
2.2.	CERÂMICAS.....	16
2.3.	POLÍMEROS.....	16
<b>2.3.1.</b>	<b>Breve histórico</b> .....	18
2.4.	COMPÓSITOS.....	18
2.5.	COMPARAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS .....	19
<b>2.5.1.</b>	<b>Metais</b> .....	20
<b>2.5.2.</b>	<b>Cerâmicas</b> .....	20
<b>2.5.3.</b>	<b>Polímeros</b> .....	20
<b>2.5.4.</b>	<b>Compósitos</b> .....	21
<b>3.</b>	<b>ISOLADORES DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO</b> .....	22
3.1.	BREVE HISTÓRICO .....	22
3.2.	ISOLADORES DE PORCELANA .....	22
<b>3.2.1.</b>	<b>Tipos mais comuns de isoladores de porcelana</b> .....	23
<b>3.2.1.1.</b>	<b>Isolador roldana</b> .....	23
<b>3.2.1.2.</b>	<b>Isolador castanha</b> .....	23
<b>3.2.1.3.</b>	<b>Isolador pino</b> .....	24
<b>3.2.1.4.</b>	<b>Isolador de suspensão ou disco</b> .....	25
<b>3.2.1.5.</b>	<b>Isolador pilar</b> .....	26
3.3.	ISOLADORES POLIMÉRICOS .....	27
<b>3.3.1.</b>	<b>Tipos mais comuns de isoladores poliméricos</b> .....	28
<b>3.3.1.1.</b>	<b>Isolador pilar</b> .....	28
<b>3.3.1.2.</b>	<b>Isolador de suspensão ou ancoragem</b> .....	29
<b>4.</b>	<b>DIFERENÇAS ENTRE ISOLADORES DE PORCELANA E POLIMÉRICOS</b>	
	30	
4.1.	PRINCIPAIS PARÂMETROS E EXEMPLOS .....	30
<b>4.1.1</b>	<b>Distância de escoamento</b> .....	30
<b>4.1.2.</b>	<b>Tensão disruptiva em frequência industrial a seco</b> .....	31

4.1.3.	Tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva .....	31
4.1.4.	Tensão suportável em frequência industrial a seco .....	32
4.1.5.	Tensão suportável em frequência industrial sob chuva .....	32
4.1.6.	Tensão disruptiva crítica a impulso atmosférico .....	32
4.2.	RESUMO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS E EXEMPLOS .....	33
4.3.	VANDALISMO .....	36
4.4.	POLUIÇÃO VISUAL .....	37
4.5.	FALHAS .....	38
4.6.	HIDROFOBICIDADE .....	39
4.7.	REDES COMPACTAS .....	40
5.	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	41
5.1.	TENSÃO MECÂNICA SOBRE OS ISOLADORES .....	41
5.2.	TENSÃO MECÂNICA SOBRE OS CABOS .....	42
5.3.	VALOR DE FLECHA .....	43
5.4.	TENSÃO VERTICAL EM ISOLADOR DE TORRE INTERMEDIÁRIA .....	44
5.5.	RESULTADOS .....	44
6.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	49
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51

## 1. INTRODUÇÃO

Embora o valor percentual que define a participação dos isoladores no custo total de implantação de uma linha de transmissão seja relativamente pequeno (até 5% do custo total), quando se contabilizam os custos da operação e manutenção, em todas as suas vertentes, a participação destes componentes tem uma parcela mais significativa (até 70% do custo total) (MENDONÇA, 2013).

A crescente demanda da população por energia elétrica requer cada vez mais a expansão dos sistemas de geração, transmissão e distribuição. Conseqüentemente, tendo em vista que os isoladores de tensão estão presentes em ambos os sistemas, a demanda por estes dispositivos tem sofrido crescimento, e, assim, muitas ações têm sido desenvolvidas por parte de fornecedores de matérias-primas, fabricantes, concessionárias, universidades e centros de pesquisas visando a uma maior confiabilidade dos sistemas energéticos.

A competitividade, as penalidades e a diminuição de custos exigem isoladores de tensão com o maior custo-benefício possível, e que agreguem segurança ao sistema. Sendo assim, no projeto de linhas de transmissão ou de distribuição, se faz necessário informações acerca dos diferentes tipos de isoladores, para ser feita a melhor escolha, tendo em vista preço, intervalo de manutenção, confiabilidade, peso, disponibilidade no mercado, entre outros fatores. Porém, estas informações são escassas e muitas vezes se resumem a catálogos de fabricantes e a fontes de informação que simplesmente afirmam que determinado tipo de isolador é melhor que outro, sem apontar dados técnicos precisos, visto que não existem estudos comparativos entre os diferentes tipos de isoladores, conforme busca realizada na internet pelo autor deste trabalho.

Desde os primeiros isoladores de madeira com corda, utilizados nos primórdios da distribuição de energia elétrica, até os atuais estudos de aplicação de nanotecnologia para implementação de diversas características dos materiais que são aplicados em isoladores poliméricos e que já isolam eletricamente linhas de transmissão de 1000 kV ou mais, a inovação tecnológica tem sido buscada com afinco e determinação, acompanhando o crescimento e o progresso da humanidade. A aplicação de materiais reconhecidamente isolantes, como vidro e porcelana, aliada a projetos desenvolvidos para também garantir a rigidez mecânica do conjunto para sustentação dos cabos condutores, está amplamente dominada e seu uso passa pela

adequação dos diferentes isoladores aos projetos das linhas, considerando especialmente as condições do ambiente. O crescente interesse pelos isoladores não cerâmicos (também chamados de poliméricos, compósitos, ou compostos), representa um significativo impulso tecnológico na aplicação de materiais antes não utilizados na isolação dos sistemas de distribuição e transmissão, como o silicone e a fibra de vidro, por exemplo. Contudo, certos aspectos ainda não dominados como tempo de vida útil, diferenças entre os isoladores cerâmicos, falhas operacionais, dentre outros aspectos, ainda carecem de estudos e pesquisas (FRONTIN, 2010).

Portanto, este trabalho faz um estudo comparativo entre isoladores de tensão de porcelana e poliméricos, objetivando a apresentação de suas diferenças e características e a apresentação de um estudo de caso.

## 2. MATERIAIS ISOLANTES

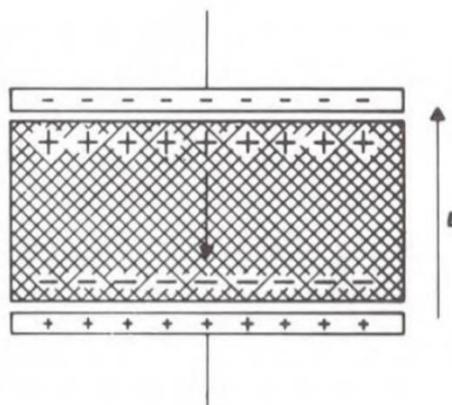
Este capítulo disserta sobre os materiais isolantes (cerâmicas, polímeros e compósitos), sobre a estrutura da matéria destes tipos de materiais e sobre uma comparação entre os materiais.

### 2.1. ESTRUTURA DA MATÉRIA

Materiais isolantes (ou dielétricos) se caracterizam pela elevada resistência elétrica à passagem de corrente, em comparação aos materiais condutores.

A propriedade fundamental dos isolantes é a polarização de suas partículas elementares (polarização dielétrica). Trata-se do fenômeno de deslocamento reversível das nuvens eletrônicas nos átomos ou moléculas quando expostos a campos elétricos externos, no qual as nuvens eletrônicas (de carga negativa) são puxadas contra o campo elétrico e os núcleos (de carga positiva) são empurrados na direção deste por forças elétricas, sem liberar as cargas dos átomos ou moléculas. A deformação das nuvens eletrônicas gerada pelo campo externo faz com que os átomos ou moléculas do meio dielétrico comportem-se como dipolos elétricos, cujo campo elétrico atua em oposição àquele externo, conforme ilustrado na Figura 1. No regime de campo elétrico de intensidade comparável à energia de ligação do átomo ou molécula, é possível gerar ionização, e nesse caso a deformação passa a ser irreversível (GRIFFITHS, 1999).

Figura 1 - Polarização dielétrica.



Fonte: SCHMIDT (1979).

Sabendo que todos os dielétricos de uso industrial apresentam certo volume reduzido de cargas livres, deve-se contar sempre com o aparecimento de uma corrente de dada intensidade através da seção transversal do isolante, quando é aplicada uma tensão ao dielétrico. O mesmo fenômeno pode ser notado sobre a superfície externa do isolante, o que define duas grandezas isolantes das mais importantes: rigidez dielétrica e resistência superficial de descarga, respectivamente.

Todos os dielétricos possuem um valor limite de solitação elétrica, valor esse que é característico de cada material. Sendo ultrapassados esses valores, ocorre uma modificação geralmente irreversível no material, como, por exemplo, sua ruptura dielétrica, deformação permanente, modificação estrutural, etc. Frequentemente, essa modificação afeta fundamentalmente as propriedades isolantes do dielétrico.

Os isolantes são caracterizados por uma série de propriedades, as quais variam de acordo com as condições físicas de seu uso (como, por exemplo, variações de temperatura e umidade, tensão elétrica aplicada, etc.). Dessa forma, por exemplo, a condutividade superficial é acentuadamente uma função das condições do ambiente em que o isolante se encontra. Entre essas condições, a influência da água, seja a de chuva, de orvalho ou de condensação, que reduz a resistividade do isolante, reduzindo, assim, a chamada resistência superficial de descarga. Como consequência, os corpos isolantes são frequentemente projetados com perfis que assegurem a proteção contra deposições dessa natureza. Ainda, ensaios para a determinação da capacidade isolante de certos elementos é feita a seco e sob chuva. A umidade relativa passa a ter influência sensível quando seu valor for superior a 50%.

Além disso, a própria natureza do material isolante vai influir. A condutividade será tanto menor quanto menos polar for o isolante, e a condutividade superficial será tanto menor quanto mais liso for o acabamento superficial e quanto mais limpa a superfície. A Tabela 1 apresenta exemplos da modificação do valor da condutividade superficial após a limpeza da superfície. Quanto a impurezas que influem sobre o seu valor, a condutividade apresenta comportamentos diferentes: em isolantes hidrófobos (repelentes de água), as impurezas têm uma influência bem menor do que nos hidrófilos (absorventes de água) (SCHMIDT, 1979).

Tabela 1 - Valores de resistência superficial ( $\rho_s$ ) de alguns materiais perante 70% de umidade relativa.

Material	$\rho_s$ [ $\Omega$ ] sem limpeza	$\rho_s$ [ $\Omega$ ] após a limpeza
Vidro comum	$2 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{11}$
Vidro de quartzo	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{13}$
Composto de mica	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{13}$

Fonte: SCHMIDT (1979).

## 2.2. CERÂMICAS

As cerâmicas são compostos formados por elementos metálicos e não-metálicos, para os quais as ligações interatômicas ou são totalmente iônicas ou predominantemente iônicas tendo, porém, alguma natureza covalente. O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria queimada”, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são atingidas normalmente através de um processo de tratamento térmico e alta temperatura chamado de cozimento (CALLISTER, 2008).

Durante os últimos 60 anos, os materiais mais importantes nessa categoria eram denominados “cerâmicas tradicionais”, ou seja, aqueles para os quais a matéria-prima primária é a argila, como por exemplo: porcelana usada em louças, porcelana, tijolos, telhas, azulejos e, ainda, vidros e cerâmicas de alta temperatura. Recentemente, ocorreu um progresso significativo em relação à compreensão da natureza fundamental desses materiais e dos fenômenos que ocorrem neles e que são responsáveis por suas propriedades únicas. Consequentemente, uma nova geração desses materiais foi desenvolvida e o termo “cerâmica” tomou um significado muito mais amplo. Em um grau ou outro, esses novos materiais possuem um efeito consideravelmente importante sobre a vida diária: as indústrias de componentes eletrônicos, de computadores, comunicação, aeroespacial e muitas outras indústrias dependem do uso desses materiais.

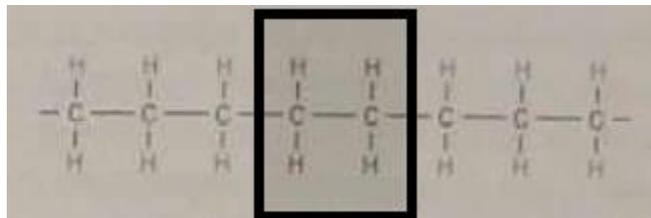
## 2.3. POLÍMEROS

Segundo a IUPAC (International Union for Pure and Applied Chemistry),

polímero é uma substância composta por moléculas que se caracterizam pela repetição múltipla de uma ou mais espécies de átomos ou grupos de átomos (unidades constitucionais) ligados uns aos outros em quantidades suficientes para produzir um conjunto de propriedades que não variam significativamente com a adição ou remoção de umas poucas unidades constitucionais

Esta repetição múltipla das unidades constitucionais (unidades monoméricas) geram longas moléculas (as macromoléculas, ou cadeias poliméricas) através da reação de polimerização. A Figura 2 apresenta um exemplo de cadeia polimérica com sua respectiva unidade monomérica, formando um polímero. Os monômeros são unidos entre si através de ligações covalentes, de forma encadeada.

Figura 2 - Cadeia polimérica do polietileno.



A região assinalada da cadeia do polietileno é a unidade monomérica etileno.

Fonte: adaptado de CALLISTER (2008).

Os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais, como, por exemplo a celulose, as proteínas, a borracha natural, etc. são produzidos pelo organismo de seres vivos. Os polímeros sintéticos, como por exemplo o polietileno, o nylon, o silicone, etc. são artificiais e sintetizados industrialmente.

Em longas cadeias poliméricas, as macromoléculas podem entrelaçar-se entre si, semelhante a um barbante enroscado. Este entrelaçamento e as forças de atração intermoleculares são incrementados conforme o peso molecular das macromoléculas é aumentado. As propriedades dos polímeros que são alteradas pelo aumento do peso molecular são: temperatura de transição vítrea, índice de fluidez, viscosidade, módulo de elasticidade e resistência mecânica. Propriedades que não são alteradas pelo aumento do peso molecular são: índice de refração, dureza, condutividade elétrica e densidade. Polímeros não possuem comportamento magnético (CALLISTER, 2008).

### 2.3.1. Breve histórico

Materiais poliméricos naturais existem e são usados há milhares de anos. Por exemplo, o consumo de grão de amido, que é formado através de polímeros de glicose, data de tempos pré-históricos. Ele é usado na preparação de colas e gomas, na fabricação de álcool etílico, entre outros usos. O algodão, constituído pelo polímero mais abundante da natureza, a celulose, data do Período Glacial.

A produção artificial de materiais poliméricos, porém, surgiu somente após a descoberta da Química Orgânica na segunda metade do século XIX. Eles surgiram da necessidade de imitar os polímeros naturais, e esse processo é feito através da síntese, a qual requer tecnologia sofisticada, pois envolve reações químicas em laboratório. Os primeiros polímeros artificiais surgiram a partir da modificação de macromoléculas naturais.

Somente no início do século XX os processos de polimerização (síntese dos polímeros a partir de unidades monoméricas) tornaram-se viáveis em grande escala. A partir de então, estes processos vem sendo aperfeiçoados, e polímeros cada vez mais sofisticados e com custos menores são gerados (MENDONÇA, 2013).

Atualmente, partículas nanométricas (argila, metais ou nanotubos) estão sendo adicionados aos polímeros, trata-se dos nanocompósitos poliméricos. Estes polímeros possuem melhores propriedades mecânicas e térmicas, são mais resistentes a solventes, possuem menor capacidade inflamatória, etc., e já estão sendo usados em novos setores: automobilístico, aeronáutico, eletrônico, comunicações, espacial, embalagens, tecidos, médico, engenharia, entre outros. (MENDONÇA, 2013).

## 2.4. COMPÓSITOS

Compósito é uma composição de dois ou mais materiais individuais, sejam eles do tipo: metais, cerâmicas e polímeros. O objetivo desta composição é combinar as propriedades destes diferentes tipos de materiais, gerando uma propriedade global que não seria possível com estes elementos isolados, e que combina as melhores características dos materiais componentes.

Há compósitos naturais, como por exemplo a madeira e o osso. Porém, a

maioria dos compósitos usados é sintético ou feito pelo homem.

Um dos compósitos mais comuns é aquele que usa fibra de vidro, em que pequenas fibras de vidro são colocadas no interior de um material polimérico (muitas vezes epóxi ou poliéster). Este compósito também é chamado de PRFV (polímero reforçado com fibras de vidro). As fibras de vidro são resistentes e rígidas, porém frágeis, enquanto que o polímero é dúctil, porém fraco e flexível. Assim, o compósito de fibra de vidro é rígido, resistente, flexível e dúctil. Além disso, ele possui baixa densidade. Outro compósito importante é o PRFC (polímero reforçado com fibras de carbono), que é formado por fibras de carbono embutidas no interior de um polímero. Estes materiais são mais rígidos e mais resistentes que os PRFVs, e mais caros, ao mesmo tempo. Assim, são usados em aplicações de alto desempenho e alta tecnologia, como aplicações aeroespaciais, tacos de golfe, esquis, raquetes de tênis, etc. (CALLISTER, 2008).

## 2.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos, no que se refere a massa específica, módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, resistência à fratura e condutividade.

Tabela 2 - Comparação entre os materiais.

Propriedade	Unidade	Metais	Cerâmicas	Polímeros	Compósitos
Massa específica	$\text{g/cm}^2$	De 1 a 30	De 1,5 a 8	De 0,7 a 3	De 0,3 a 3
Módulo de elasticidade	GPa	De 25 a 800	De 10 a 1000	De 0,002 a 7	De 2 a 500
Limite de resistência à tração	MPa	De 60 a 3500	De 50 a 1500	De 10 a 100	De 20 a 2500
Resistência à fratura	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	De 20 a 200	De 0,15 a 6	De 0,4 a 5	De 0,4 a 90
Condutividade elétrica	$[\Omega \cdot \text{m}]^{-1}$	De $10^2$ a $10^8$	De $10^{-17}$ a $10^{-9}$	De $10^{-18}$ a $10^{-9}$	---

Fonte: CALLISTER (2008).

### **2.5.1. Metais**

No que se refere ao arranjo de átomos, os metais são elementos relativamente densos, em comparação às cerâmicas e aos polímeros (primeira linha da Tabela 2). Em relação às características mecânicas, são materiais relativamente rígidos (segunda linha da Tabela 2) e resistentes (terceira linha da Tabela 2), e, ainda assim, são dúcteis, ou seja, são capazes de sofrer grandes quantidades de deformação sem sofrer fratura (quarta linha da Tabela 2). Ainda, pelo fato dos elétrons estarem livres nos metais, este tipo de material é extremamente bom condutor (quinta linha da Tabela 2).

### **2.5.2. Cerâmicas**

Em relação ao comportamento mecânico, os materiais cerâmicos são relativamente rígidos e resistentes (a rigidez e a resistência são comparáveis àquelas dos metais) (segunda e terceira linha da Tabela 2). Por outro lado, elas são extremamente frágeis (ausência de ductilidade) e altamente suscetíveis à fratura (quarta linha da Tabela 2). Por fim, estes materiais são tipicamente isolantes à passagem de eletricidade (quinta linha da Tabela 2).

### **2.5.3. Polímeros**

Tipicamente, estes materiais possuem baixas densidades (primeira linha da Tabela 2), enquanto que as suas características mecânicas são, em geral, diferentes das características exibidas pelos materiais metálicos e cerâmicos – eles não são tão rígidos nem tão resistentes como estes materiais (segunda e terceira linha da Tabela 2). Entretanto, com base nas suas densidades reduzidas, muitas vezes a sua rigidez e resistência em relação à sua massa são comparáveis às dos metais e das cerâmicas. Ainda, muitos dos polímeros são extremamente dúcteis e flexíveis. Estes materiais, por fim, possuem baixa condutividade elétrica (quinta linha da Tabela 2)

#### **2.5.4. Compósitos**

Estes materiais são relativamente rígidos, resistentes (segunda e terceira linha da Tabela 2), flexíveis e dúcteis. Além disso, possuem baixa densidade (primeira linha da Tabela 2).

### 3. ISOLADORES DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

Isoladores têm a finalidade de isolar eletricamente um corpo condutor de outros corpos, condutores ou não condutores. Eles são dotados de propriedades mecânicas capazes de suportar os esforços produzidos pelos condutores. Os tipos mais usados são os cerâmicos, vítreos e poliméricos.

Os isoladores, entre outros fatores, podem influenciar os indicadores de qualidade e continuidade do serviço de distribuição e transmissão de energia elétrica prestados pelas companhias e fiscalizados pela ANEEL, como: DEC, FEC, DIC, FIC, entre outros.

#### 3.1. BREVE HISTÓRICO

Os primeiros isolamentos de cabos de uma rede elétrica foram com o uso de estacas de madeira. Porém estes isoladores não apresentavam bons resultados à medida que crescia o comprimento ou a tensão elétrica das linhas de transmissão. Isoladores ganharam grande importância e vários modelos foram criados quando da necessidade de expansão das redes de telégrafos.

Os primeiros isoladores comerciais eram de porcelana e foram fabricados no Reino Unido a partir de 1840. Com a invenção de isoladores de suspensão, logo foi possível a transmissão de energia elétrica em alta tensão. A partir de então, a demanda de utilização de isoladores aumentou e possibilitou o surgimento de uma grande variedade de isoladores (MENDONÇA, 2013).

No Brasil, um grande contribuinte para a evolução dos isoladores foi o Barão de Capanema, que inventou um isolador mais específico e resistente às características do clima brasileiro durante a necessidade de expansão das linhas de telégrafos.

#### 3.2. ISOLADORES DE PORCELANA

A porcelana utilizada em isoladores é do tipo não porosa, de elevada resistência mecânica, quimicamente inerte e de ponto de fusão elevado. Normalmente os isoladores de porcelana são produzidos pelo chamado processo úmido, no qual a desumidificação é feita por gesso ou a vácuo.

Toda a superfície exposta da porcelana deve ser vitrificada, para isolar a porcelana da umidade. Sendo assim, em caso de trincas ou rachaduras, os isoladores devem ser substituídos, e não retocados com algum produto de recobrimento, como o esmalte, por exemplo.

### **3.2.1. Tipos mais comuns de isoladores de porcelana**

Os tipos mais comuns de isoladores de porcelana são listados de 3.2.1.1 a 3.2.1.5.

#### **3.2.1.1. Isolador roldana**

Utilizado predominantemente em redes de distribuição urbana e rural secundária (baixa tensão, de 127V a 440V), mostrado na Figura 3 (MAMEDE, 2013).

Figura 3 - Isolador de porcelana do tipo roldana.



Fonte: GERMER (2015).

#### **3.2.1.2. Isolador castanha**

Utilizado predominantemente em redes de distribuição urbana e rural secundária (baixa tensão, de 127V a 440V), mostrado na Figura 4 (MAMEDE, 2013).

Figura 4 - Isolador de porcelana do tipo castanha.



Fonte: GERMER (2015).

### 3.2.1.3. Isolador pino

Utilizado predominantemente em redes de distribuição rural e urbana primária (média tensão até 38kV). Com menor frequência são utilizados em linhas de subtransmissão (alta tensão até 72kV). Um isolador de porcelana do tipo pino é mostrado na Figura 5 (MAMEDE, 2013).

Figura 5 - Isolador de porcelana do tipo pino.



Fonte: GERMER (2015).

Há diferentes tipos dos isoladores do tipo pino, no que se refere ao nível de poluição do meio de utilização. Aqueles do tipo *antipoluição* apresentam maior distância de escoamento e são usados em ambientes cuja atmosfera é carregada de poluentes, como no caso da orla marítima. A geometria específica dificulta as fugas de corrente para a estrutura onde o isolador está fixado, atenuadas pelos poluentes (MAMEDE, 2013).

### 3.2.1.4. Isolador de suspensão ou disco

Utilizados em redes de distribuição urbana e rural primária (média tensão até 38kV) e em linhas de subtransmissão (alta tensão até 138kV). Estes isoladores são mostrados na Figura 6 (MAMEDE, 2013).

Figura 6 - Isolador de porcelana do tipo suspensão ou disco.



Fonte: GERMER (2015).

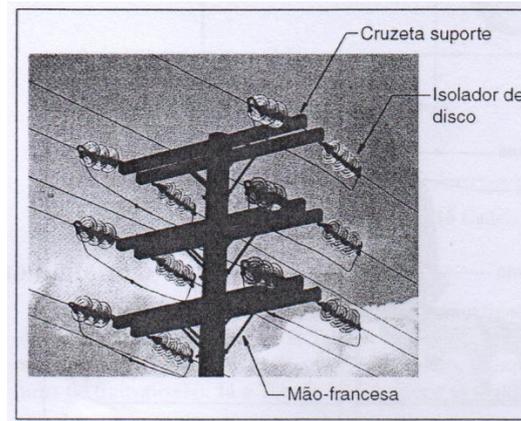
Os isoladores de disco podem ser utilizados em qualquer tensão elétrica, dependendo apenas do número de isoladores instalados em série. Este tipo de acoplamento é apresentado na Figura 7. Isoladores de disco podem ser instalados tanto em estruturas de ancoragem (onde a força de tração é aplicada horizontalmente sobre o isolador, conforme Figura 8) quanto em estruturas de suspensão (onde a força de tração é aplicada verticalmente sobre o isolador, conforme Figura 9) (MAMEDE, 2013).

Figura 7 - Cadeia de isoladores do tipo suspensão ou disco.



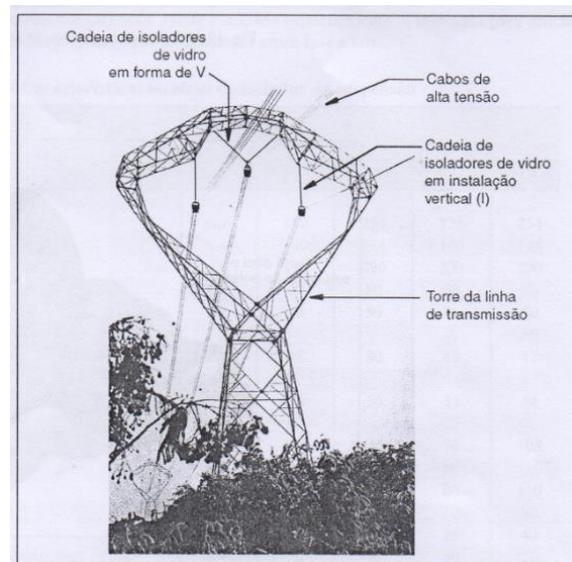
Fonte: ALI EXPRESS (2016).

Figura 8 - Isoladores de disco instalados em estrutura de ancoragem.



Fonte: MAMEDE (2013).

Figura 9 - Isoladores de disco instalados em estrutura de suspensão.



Fonte: MAMEDE (2013).

### 3.2.1.5. Isolador pilar

Utilizado predominantemente em redes de distribuição rural e urbana primária (média tensão até 38kV). Com menor frequência são utilizados em linhas de subtransmissão (alta tensão até 72kV). Um isolador de porcelana do tipo pilar é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Isolador de porcelana pilar.



Fonte: GERMER (2015).

### 3.3. ISOLADORES POLIMÉRICOS

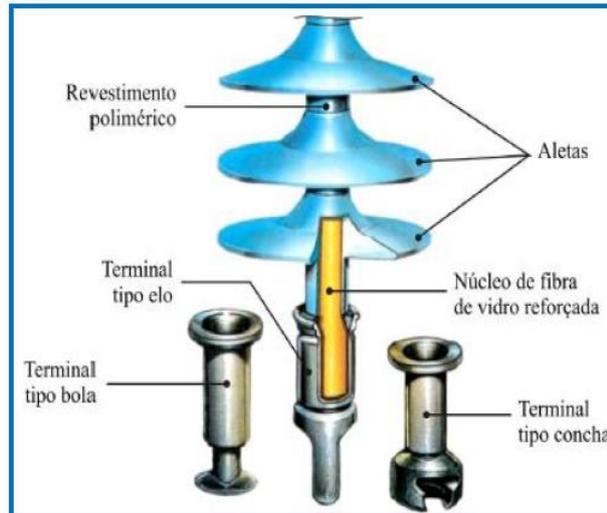
O núcleo de isoladores poliméricos é constituído por uma haste de fibra de vidro reforçada por um polímero do tipo epóxi (a mais usual), poliéster ou vinil. Sendo assim, o núcleo é um compósito PRFV (polímero reforçado com fibras de vidro). Este núcleo deve suportar os esforços mecânicos impostos pelo peso do cabo ou por vibrações eólicas sem afetar suas propriedades isolantes (MENDONÇA, 2013). As dimensões desta haste são função das características elétricas e mecânicas necessárias (MAMEDE, 2013).

Para revestimento desta haste, um composto especial é aplicado, com o intuito de protegê-lo contra agentes externos (umidade, contaminadores químicos, radiação ultravioleta, etc.). Este revestimento pode ser de vários tipos: SR (silicone rubber), ou borracha de silicone (a mais usual), EPM (etileno-propileno-metileno), EPDM (etileno-propileno-dieno-metileno), CE (epóxi cicloalifática), EVA (acetato de vinil-etileno) ou PTFE (politetrafluoretileno) (MENDONÇA, 2013). As aletas, as quais caracterizam a distância de escoamento do isolador e, conseqüentemente, caracterizam este sobre sua aplicação, principalmente no que se refere a poluição e umidade, fazem parte do revestimento (MAMEDE, 2013).

Nas extremidades da haste são fixadas, por processo de compressão, as ferragens de sustentação do isolador na estrutura e de fixação do cabo no isolador.

A Figura 11 apresenta as partes componentes de um isolador polimérico.

Figura 11 - Partes componentes de um isolador polimérico.



Fonte: MENDONÇA (2013).

Os isoladores poliméricos comumente possuem algumas nomenclaturas, a saber:

- 1) não cerâmicos: nome que faz alusão a uma classe diferente daquela dos isoladores de porcelana;
- 2) compostos: nome que se refere ao revestimento externo;
- 3) poliméricos: nome que se refere ao material que reforça a fibra de vidro constituinte do núcleo do isolador;
- 4) compósitos: nome que se refere ao núcleo do isolador, o compósito PRFV (polímero reforçado com fibras de vidro).

### 3.3.1. Tipos mais comuns de isoladores poliméricos

Os tipos mais comuns de isoladores poliméricos são aqueles do tipo pilar e aqueles do tipo suspensão ou ancoragem.

#### 3.3.1.1. Isolador pilar

Utilizado predominantemente em redes de distribuição rural e urbana primária (média tensão até 38kV). Com menor frequência são utilizados em linhas de subtransmissão (alta tensão até 72kV). Um isolador polimérico do tipo pilar é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Isolador polimérico do tipo pilar.



Fonte: BALESTRO (2015).

### 3.3.1.2. Isolador de suspensão ou ancoragem

Utilizados em redes de distribuição urbana e rural primária (média tensão), disponibilizados, por exemplo, pela Germer Isoladores em tensões elétricas de 15kV a 35kV e em linhas de transmissão ou subtransmissão (extra alta tensão, ou alta tensão), disponibilizados, por exemplo, pela Grantel Equipamentos em tensões elétricas de 69kV a 1000kV. Um isolador polimérico de suspensão ou ancoragem é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Isolador polimérico de suspensão ou ancoragem.



Fonte: EMD (2016).

## 4. DIFERENÇAS ENTRE ISOLADORES DE PORCELANA E POLIMÉRICOS

Neste capítulo são apresentadas as diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos.

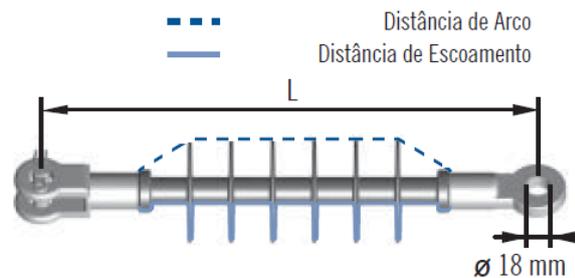
### 4.1. PRINCIPAIS PARÂMETROS E EXEMPLOS

Os principais parâmetros acerca dos isoladores de porcelana e poliméricos e exemplos destes parâmetros estão apresentados na seção 4.1.1 a 4.1.6.

#### 4.1.1 Distância de escoamento

É a distância medida entre o ponto de contato metálico energizado e o ponto de fixação do isolador, considerando todo o percurso externo entre os dois pontos (MAMEDE, 2013), conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Medida da distância de escoamento.



Fonte: adaptado de BALESTRO (2015).

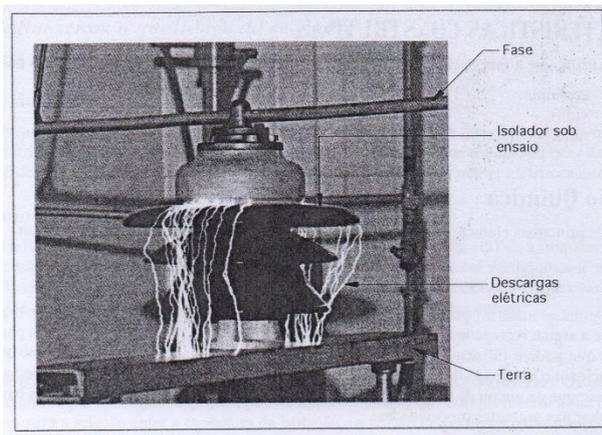
Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo pilar, a distância de escoamento é 300mm para um isolador de porcelana fabricado pela Germer e 380mm para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo suspensão, a distância de escoamento é 180mm para um isolador de porcelana fabricado pela Germer (considerado um único disco) e 430mm para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

#### 4.1.2. Tensão disruptiva em frequência industrial a seco

É o limite da tensão aplicada a um isolador à frequência nominal do sistema, acima da qual ocorre uma descarga elétrica pela superfície externa durante um ensaio de laboratório realizado à temperatura ambiente, estando o isolador seco e limpo (MAMEDE, 2013). A Figura 15 mostra o momento de uma descarga elétrica sobre um isolador em um laboratório de testes.

Figura 15 - Descarga elétrica sobre um isolador.



Fonte: MAMEDE (2013).

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo pilar, a tensão disruptiva a seco não é fornecida pela Germer para um isolador de porcelana e é 75kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo suspensão, a tensão disruptiva a seco é 60kV para um isolador de porcelana fabricado pela Germer (considerado um único disco) e não é fornecida pela Balestro para um isolador polimérico.

#### 4.1.3. Tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva

É o limite da tensão aplicada a um isolador à frequência nominal do sistema, acima da qual ocorre uma descarga elétrica pela superfície externa durante um ensaio de laboratório realizado à temperatura ambiente, estando o isolador sob chuva moderada (MAMEDE, 2013).

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo pilar, a tensão disruptiva sob chuva não é fornecida pela Germer para um isolador de porcelana e é

60kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo suspensão, a tensão disruptiva sob chuva é 30kV para um isolador de porcelana fabricado pela Germer (considerado um único disco) e 90kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

#### **4.1.4. Tensão suportável em frequência industrial a seco**

É o valor eficaz da tensão à frequência nominal do sistema que um isolador pode suportar durante 1 minuto, estando o isolador seco e limpo (MAMEDE, 2013).

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo pilar, a tensão suportável a seco não é fornecida pela Germer para um isolador de porcelana e é 70kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo suspensão, a tensão suportável a seco é 50kV para um isolador de porcelana fabricado pela Germer (considerado um único disco) e 80kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

#### **4.1.5. Tensão suportável em frequência industrial sob chuva**

É o valor eficaz da tensão à frequência nominal do sistema que um isolador pode suportar durante 10 segundos, estando o isolador sob chuva moderada (MAMEDE, 2013).

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo pilar, a tensão suportável sob chuva é 34kV para um isolador de porcelana fabricado pela Germer e 50kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo suspensão, a tensão suportável sob chuva é 25kV para um isolador de porcelana fabricado pela Germer (considerado um único disco) e 70kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro.

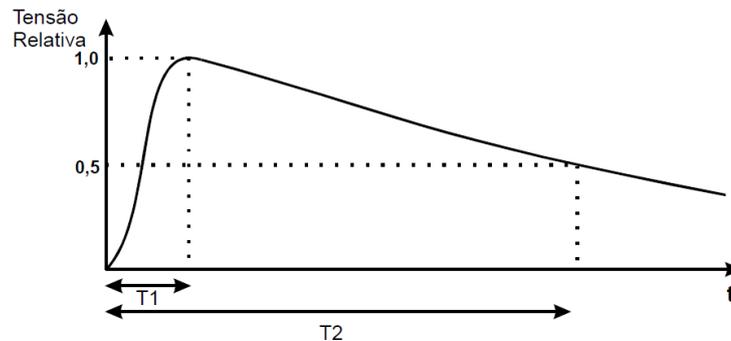
#### **4.1.6. Tensão disruptiva crítica a impulso atmosférico**

É o limite da tensão de impulso com onda normalizada de  $1,2 \times 50 \mu s$  que é

aplicada a um isolador, durante um ensaio de laboratório, sem que ocorra nenhuma descarga (MAMEDE, 2013).

A onda normalizada de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$  é uma forma típica de onda que simula uma descarga atmosférica, onde, conforme a Figura 16, o tempo de subida ( $T_1$ ) é  $1,2 \mu\text{s}$  e o tempo de descida ( $T_2$ ) é  $50 \mu\text{s}$  (JANSSEN, 2005).

Figura 16 - Forma de onda típica de impulso atmosférico.



Fonte: JANSSEN (2005).

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo pilar, a tensão disruptiva crítica a impulso atmosférico não é fornecida pela Germer para um isolador de porcelana e é 145kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro (para polaridade positiva da forma de onda do impulso) ou 155kV (para polaridade negativa da forma de onda do impulso).

Para a classe de isolamento de 15kV em isoladores do tipo suspensão, a tensão disruptiva crítica a impulso atmosférico é 100kV para um isolador de porcelana de único disco fabricado pela Germer (tanto para polaridade positiva quanto para polaridade negativa da forma de onda do impulso), e 150kV para um isolador polimérico fabricado pela Balestro (para polaridade positiva da forma de onda do impulso) ou 210kV (para polaridade negativa da forma de onda do impulso).

#### 4.2. RESUMO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS E EXEMPLOS

Os principais parâmetros e exemplos apresentados no sub capítulo 4.1 foram resumidos na Tabela 3, a qual apresenta, também: diâmetro, comprimento, peso e carga mecânica nominal, para os isoladores do tipo pilar e suspensão.

Tabela 3 - Principais parâmetros de isoladores de porcelana e poliméricos.

Propriedade	Isolador tipo pilar		Isolador tipo suspensão	
	Porcelana	Polimérico	Porcelana	Polimérico
Distância de escoamento [mm]	300	380	180	430
Tensão disruptiva em frequência industrial a seco [kV]	-	75	60	-
Tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva [kV]	-	60	30	90
Tensão suportável em frequência industrial a seco [kV]	-	70	50	80
Tensão suportável em frequência industrial sob chuva [kV]	34	50	25	70
Tensão disruptiva crítica a impulso atmosférico [kV]	-	145 (polaridade positiva) ou 155 (polaridade negativa)	100 (polaridade positiva) ou 100 (polaridade negativa)	150 (polaridade positiva) ou 210 (polaridade negativa)
Diâmetro [mm]	125	88	165	88
Comprimento [mm]	250	220	140	335
Massa [kg]	4,5	1,85	2,16	1,3
Carga mecânica nominal [kN]	-	8	22	50

Fonte: o autor.

A Tabela 3 foi resumida na Tabela 4, a qual apresenta comparações percentuais referentes aos valores dos isoladores poliméricos da Tabela 3 em relação aos valores dos isoladores de porcelana da Tabela 3, para o respectivo tipo ( pilar ou suspensão).

Tabela 4 - Resumo em percentual da Tabela 3.

Propriedade	Isolador tipo pilar (polimérico em relação a porcelana)	Isolador tipo suspensão (polimérico em relação a porcelana)
Distância de escoamento [mm]	126,66%	238,88%
Tensão disruptiva em frequência industrial a seco [kV]	-	-
Tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva [kV]	-	300,00%
Tensão suportável em frequência industrial a seco [kV]	-	160,00%
Tensão suportável em frequência industrial sob chuva [kV]	147,05%	280,00%
Tensão disruptiva crítica a impulso atmosférico [kV]	-	150,00% (polaridade positiva) e 210,00% (polaridade negativa)
Diâmetro [mm]	70,40%	53,33%
Comprimento [mm]	88,00%	239,28%
Massa [kg]	41,11%	60,18%
Carga mecânica nominal [kN]	-	227,27%

Fonte: o autor.

### 4.3. VANDALISMO

No período de 1988 a 2001 ocorreram 339 desligamentos das linhas de transmissão de Companhia Hidroelétrica do São Francisco, dos quais 75% foram originados por vandalismo (CARVALHO, 2008).

Geralmente o vandalismo em isoladores de tensão em redes de distribuição e transmissão são causados por tiros de armas de fogo, os quais danificam parcialmente ou totalmente o material constituinte da parte externa do isolador, causando descargas elétricas ou curto circuitos do tipo fase-terra, e, possivelmente, desligamentos originados pela proteção (CARVALHO, 2008).

Isoladores de porcelana são menos resistentes ao vandalismo, visto que, por exemplo, tiros causam maiores danos a este tipo de isoladores, em comparação a isoladores poliméricos (COSER, 2009). Ainda, isoladores de porcelana possuem diâmetros maiores em comparação aos poliméricos, aumentando, assim, a área susceptível a recebimento de disparos, por exemplo.

Por outro lado, materiais compósitos poliméricos possuem certa resistência a tiros de arma de fogo calibre 38 para espessuras maiores do que 6mm, porém podem se fragmentar após sucessivos disparos (CARVALHO, 2008).

No dia 08/09/2012, das 13h03 às 22h17 as cidades de São João do Piauí, João Costa, Nova Santa Rita, Pedro Laurentino, Capitão Gervásio Oliveira, Campo Alegre do Fidalgo, Lagoa do Barro e Queimada Nova, todas localizadas no Estado do Piauí, ficaram sem fornecimento de energia elétrica devido a atos de vandalismo praticados possivelmente com o uso de arma de fogo em isoladores de disco de um circuito que atende a principal subestação de São João do Piauí, a qual deriva, também, circuitos para as demais cidades. A Figura 17 apresenta os discos danificados, nos quais restaram, apenas, os núcleos dos isoladores e as ferragens de sustentação (PÉ DE FIGUEIRA, 2016).

Figura 17 - Vandalismo em isoladores de porcelana.



Fonte: PÉ DE FIGUEIRA (2016).

#### 4.4. POLUIÇÃO VISUAL

Isoladores poliméricos de suspensão ou ancoragem podem apresentar diâmetro 46,66% menor em comparação ao equivalente de porcelana, conforme apresentado neste trabalho. Sendo assim, em uma paisagem onde há linhas de transmissão ou distribuição, a parcela ocupada do campo visual por isoladores é menor para os isoladores poliméricos, causando menor poluição visual, conforme exemplificado pelas Figuras 18 (onde a linha é composta por isoladores de porcelana) e 19 (onde a linha é composta por isoladores poliméricos).

Figura 18 - Linha com isoladores de porcelana.



Fonte: MADE-IN-CHINA (2016).

Ainda, isoladores poliméricos da cor cinza claro causam menos impacto visual, em comparação a isoladores de porcelana cor marrom (BALESTRO, 2015).

Figura 19 - Linha com isoladores poliméricos.



Fonte: ORIENT POWER (2016).

#### 4.5. FALHAS

Conforme LISBOA, M. B. et al, as causas da falha em serviço de um isolador polimérico instalado há 13 anos em uma linha de transmissão de 138kV que ocasionaram no rompimento deste foram devidas a uma série de características construtivas inadequadas que possibilitaram a penetração e permanência de água na terminação inferior do isolador. A água em contato com o núcleo possibilitou a corrosão sob tensão do núcleo do isolador a longo prazo, e a posterior fratura do isolador. A partir dos resultados deste estudo, a concessionária administradora desta linha de transmissão promoveu a substituição de todos os isoladores semelhantes a este (LISBOA et al, 2011).

Figura 20 - Falha em isolador polimérico.

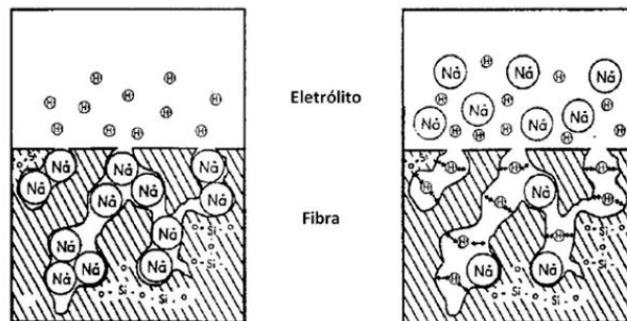


Em (a) o local da falha. Em (b) a superfície do núcleo onde ocorreu a fratura.

Fonte: LISBOA et al (2011).

A fragilização da fibra de vidro ocorre quando ela é exposta a íons de hidrogênio que estão na água, quando esta carrega algum ácido (originado, por exemplo, pela chuva ácida, ou pelo ácido nítrico originado pela formação de dióxido de nitrogênio na ocorrência do efeito corona, o qual pode ocorrer em isoladores de alta tensão). Os íons de hidrogênio expulsam e ocupam o local dos íons não silicosos da fibra de vidro, principalmente boro, cálcio, alumínio e sódio (Figura 21), causando trincas na fibra que, com a posterior sollicitação mecânica do isolador, levam ao rompimento do material (LISBOA et al, 2011).

Figura 21 - Substituição iônica da fibra de vidro do isolador polimérico.



Fonte: LISBOA et al (2011).

Ainda, envelhecimentos acelerados dos isoladores poliméricos podem ocasionar modificações químicas da borracha de silicone da parte do revestimento destes isoladores (COSER, 2009).

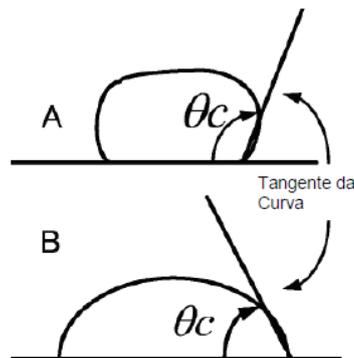
Sendo assim, técnicas de inspeção são fundamentais para prevenção de falhas dos isoladores, tanto após a fabricação, para detecção de defeitos de fabricação, quanto sistematicamente durante o funcionamento destes, para detecção de falhas originadas com o envelhecimento ou com vandalismos, por exemplo. Algumas destas técnicas são a inspeção termográfica, a inspeção por detecção de radiação ultravioleta e a inspeção por detecção de ultrassom (MENDONÇA, 2013).

#### 4.6. HIDROFOBICIDADE

Hidrofobicidade de um material é a resistência deste ao molhamento. A superfície hidrofóbica é frequentemente avaliada quantitativamente pelo valor do ângulo de contato formado entre as gotas de água e a superfície do material. Na

Figura 22, em (A) é apresentado uma gota de água sobre uma superfície de um material hidrofóbico, e em (B) é apresentado uma gota de água sobre uma superfície de um material não hidrofóbico, ou hidrofílico. O ângulo de contato ( $\theta_c$ ) é o ângulo que a interface do líquido faz com a superfície do sólido onde a gota repousa, conforme Figura 22. Quanto maior este ângulo, mais hidrofóbico é o material (COSER, 2009).

Figura 22 - Ângulo de contato da hidrofobicidade.



Fonte: COSER (2009).

Em isoladores poliméricos, a borracha de silicone do revestimento tem alto grau de hidrofobicidade, o que favorece a uma menor incidência de correntes de fugas. Em isoladores de porcelana, a superfície tem baixo grau de hidrofobicidade, o que favorece a formação de uma película de água, e, conseqüentemente, favorece a uma maior incidência de correntes de fugas (COSER, 2009).

Em áreas poluídas, é ideal a utilização de isoladores com alto grau de hidrofobicidade (THOMAZINI, 2009).

Por outro lado, isoladores poliméricos podem perder gradativamente o grau de hidrofobicidade durante o envelhecimento, dependendo das características do meio onde este se encontra instalado, e, com isso, podem apresentar falhas a longo prazo originadas pelo aumento das correntes de fuga que a perda de hidrofobicidade gera (THOMAZINI, 2009).

#### 4.7. REDES COMPACTAS

Apenas isoladores e espaçadores poliméricos são utilizados em redes de distribuição compactas (RDC) de várias companhias, como na CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica), no Rio Grande do Sul, por exemplo (CEEE-D, 2012).

## 5. ESTUDO DE CASO

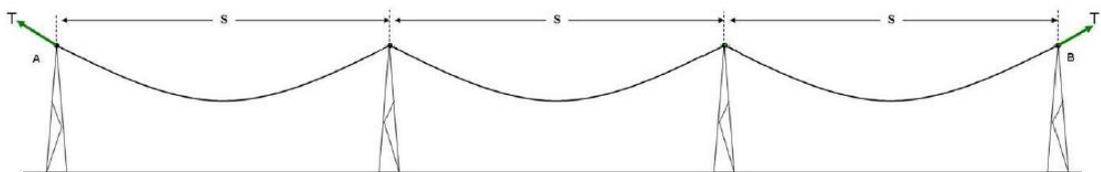
Um estudo de caso hipotético foi feito para comparar a quantidade de torres necessárias em uma linha de transmissão de 500km e 500kV, tendo como variável apenas o tipo de isolador (de porcelana ou polimérico). Variáveis que podem alterar os resultados do estudo de caso (como vento, campo elétrico, distância de segurança, irregularidades do terreno, curvas ou desvios da linha, entre outras) não são consideradas.

### 5.1. TENSÃO MECÂNICA SOBRE OS ISOLADORES

Em linhas de transmissão, o vão é o espaço entre duas torres da linha. Quando o cabo do vão está fixado em ambas as pontas por isoladores instalados na configuração de ancoragem, o vão é chamado de isolado. Quando o cabo do vão está fixado em ambas as pontas por isoladores instalados na configuração de suspensão, o vão é chamado de contínuo (BEZERRA, 2010).

Na Figura 23, os isoladores das extremidades são os únicos instalados na configuração de ancoragem. Todos os demais estão na configuração de suspensão. As torres da extremidade sofrem o efeito da tensão mecânica  $T$  provocada pelo cabo.

Figura 23 - Linha de transmissão hipotética.



Fonte: BEZERRA (2010).

Esta tensão mecânica  $T$  pode ser decomposta em uma componente horizontal  $H$ , constante em todo o vão, e em uma componente vertical  $V$ . A componente vertical é igual ao peso do cabo referente ao vão ligado à estrutura. Considerando o vão de comprimento  $S$  da Figura 23, e utilizando uma aproximação da catenária (curva matemática que descreve o comportamento de uma cabo suspenso horizontalmente) através de uma parábola, a tensão vertical nas estruturas A e B são definidas pela Equação (1). Esta aproximação é válida para vãos de poucas centenas de metros

(BEZERRA, 2010).

$$V_A = V_B \approx \frac{WS}{2} \quad (1)$$

onde  $V_A$  é a tensão vertical na estrutura A [kgf],  $V_B$  é a tensão vertical na estrutura B [kgf],  $W$  é a massa por unidade de comprimento do cabo [kg/km] e  $S$  é o comprimento do vão [km].

Em um vão contínuo intermediário, com torres construídas em linha reta e em terreno plano, e sem vento, os isoladores da torres intermediárias somente recebem esforços verticais, já que as forças horizontais são iguais e de sentidos opostos, anulando-se. Sendo assim, a força vertical sobre o isolador é devido ao peso do condutor dos dois vãos adjacentes. Então, seguindo o princípio de que a tensão vertical  $V_A$  será transmitida a uma torre intermediária, bem como a tensão vertical  $V_B$  também será, multiplica-se a Equação (1) por dois, e chega-se a Equação (2).

$$V \approx W.S \quad (2)$$

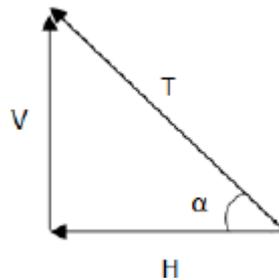
onde  $V$  é a força vertical sobre um isolador de uma torre intermediária [kgf],  $W$  é o peso por unidade de comprimento do cabo [kg/km] e  $S$  é o comprimento do vão [km].

## 5.2. TENSÃO MECÂNICA SOBRE OS CABOS

A tensão mecânica sobre o cabo pode ser calculada a partir da decomposição desta tensão exatamente no ponto em que o cabo é fixado ao isolador de ancoragem, conforme a Figura 24.

Fazendo a decomposição obtém-se as tensões axiais nos pontos A e B da Figura 23, conforme Equação (3).

Figura 24 - Decomposição de tensão mecânica sobre o cabo.



Fonte: BEZERRA (2010).

$$T = T_A = T_B = \frac{H}{\cos(\alpha)} \quad (3)$$

onde  $T$  é a tensão mecânica no cabo [kgf],  $T_A$  é a tensão axial no ponto A [kgf],  $T_B$  é a tensão axial no ponto B [kgf],  $H$  é a componente horizontal da tensão [kgf], e  $\alpha$  é o ângulo que a tensão  $T$  forma com a horizontal [°].

O cabo escolhido foi do tipo CAA (cabos nus de alumínio entrelaçados, com alma de aço), de codinome Falcon, o qual possui uma massa por unidade de comprimento  $W$  de 3042,9kg/km e uma carga de ruptura de 24750kgf (PRYSMIAN, 2016). Considerando que a tensão mecânica do cabo opera em seu valor limite, que é igual a 23% da carga de ruptura, ou seja, 5692,5kgf (NBR 5422, 1985), tem-se que a componente horizontal da tensão  $H$  é 5692,5kgf, pois, para esta linha de transmissão hipotética, considerou-se a tensão mecânica do cabo  $T$  igual à componente horizontal  $H$ , devido ao fato do ângulo  $\alpha$  ser pequeno.

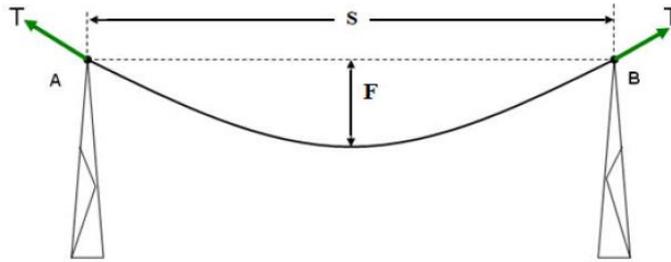
### 5.3. VALOR DE FLECHA

O valor de flecha é definido como o comprimento vertical medido desde uma linha que une o topo de duas linhas de transmissão até o cabo, conforme Figura 25. Para o caso particular em que as torres do vão estão na mesma altura, o valor de flecha coincide com o ponto mais baixo da catenária, e seu valor é dado conforme a Equação (4) (BEZERRA, 2010).

$$F = \frac{H}{W} \left( \cosh \frac{S \cdot W}{2 \cdot H} - 1 \right) \quad (4)$$

onde  $F$  é o valor de flecha [km],  $H$  é a componente horizontal da tensão  $T$  [kgf],  $W$  é a massa por unidade de comprimento do cabo [kg/km] e  $S$  é o comprimento do vão [km].

Figura 25 - Valor de flecha.



Fonte: BEZERRA (2010).

Para o cabo escolhido, e fixando o valor de flecha em 13m (ou, 0,013km), tem-se que o vão máximo suportável para este cabo, nas condições estipuladas para esta linha de transmissão, é 0,440km, calculado conforme a Equação (4).

#### 5.4. TENSÃO VERTICAL EM ISOLADOR DE TORRE INTERMEDIÁRIA

Com um vão de 0,440km, um isolador de uma torre intermediária receberá uma tensão mecânica vertical de 1338,87kgf, ou 13,12kN, calculado conforme a Equação (2). Considerando, por exemplo, 4 cabos por fase, o isolador receberá uma tensão mecânica vertical 4 vezes maior, ou seja, 5355,48kgf, ou 52,48kN.

#### 5.5. RESULTADOS

Considerando as linhas de transmissão altas o suficiente para que um aumento do valor de flecha não atinja um valor crítico para a altura do cabo em relação ao solo, variou-se o valor de flecha mantendo-se constante a componente horizontal da tensão mecânica no cabo (5692,5kgf), para ser feita a análise da tensão vertical sobre um isolador de uma torre intermediária, nos casos em que o isolador suporta 1 cabo por fase e 4 cabos por fase, sendo que o recomendado, para 500kV, é 4 cabos por fase,

devido ao fato das perdas de potência serem menores (FUCHS, 1977). Os resultados são apresentados na Tabela 5, onde o valor de flecha foi variado arbitrariamente, e o valor do vão foi obtido através da Equação (4), e, posteriormente, o valor da tensão mecânica no isolador (para 1 cabo) foi obtido com a Equação (2). O valor da tensão mecânica no isolador para 4 cabos é obtido multiplicando-se por 4 o valor da tensão mecânica no isolador para 1 cabo.

Tabela 5 - Tensão no isolador.

Flecha [km]	Vão [km]	Tensão no isolador para 1 cabo [kN]	Tensão no isolador para 4 cabos [kN]	Porcelana	Polimérico
0,013	0,44	13,12	52,48	Ok	Ok
0,015	0,473	14,11	56,42	Ok	Ok
0,017	0,504	15,03	60,12	Ok	Ok
0,019	0,532	15,86	63,46	Ok	Ok
0,021	0,56	16,70	66,80	Limite	Ok
0,023	0,586	17,47	69,90	Nok	Ok
0,025	0,61	18,19	72,76	Nok	Ok
0,027	0,634	18,91	75,62	Nok	Ok
0,029	0,657	19,59	78,37	Nok	Ok
0,068	1,0013	30,21	120,83	Nok	Limite

Fonte: o autor.

Nas últimas colunas da Tabela 5, tem-se a possibilidade (ok), a impossibilidade (nok) ou a possibilidade de uso no limite (limite) em relação ao respectivo tipo de isolador, tendo em vista a carga mecânica especificada (ou de rotina). Estas possibilidades foram analisadas conforme o isolador de porcelana modelo 8022804 fabricado pela Isoladores Santa Terezinha, cujas características são apresentadas na Figura 26, e conforme o isolador polimérico modelo FXBW500 fabricado pela Grantel, cujas características são apresentadas na Figura 27.

Figura 26 - Dados do fabricante do isolador de porcelana modelo 8022804.

Referência nova		New reference		802.2804
Norma IEC 60305		IEC 60305 class		***
CARGA STRENGTH	Eletromecânica de ruptura	Mechanical-electrical failing load		kN 133,0
	Mecânica de rotina	Routine mechanical strength		kN 66,5
	Mecânica de impacto	Mechanical impact strength		N.m 6,0
ACOPLAM. COUPLING	Norma NBR 7108	NBR 7108 class		- 18N
	Norma IEC 60120	IEC 60120 class		- ***
	Norma ANSI C29.2	ANSI C29.2 class		- J
Distância de escoamento		Leakage (creepage) distance		mm 295
Diâmetro nominal D		Diameter		mm 255
Passo P		Spacing		mm 146
Peso líquido por peça		Unit net weight		kg 6,30

Fonte: ISOLADORES SANTA TEREZINHA (2016).

Figura 27 - Dados do fabricante do isolador polimérico modelo FXBW500.

Modelo Modelo	Características Físicas Características físicas				Peso (kg) Peso (kg)
	Comprimento - H Longitud - H (mm)	Distância de Escoamento Distancia de fuga (mm)	Distância de arco a seco Distancia de arco a seco (mm)	Carga Mecânica especificada Carga mecanica especificada (kN)	
FXBW500-120-14300-3980-C16A-B16A-A	3980	14300	3740	120	22,80

Fonte: GRANTEL (2015).

Considerando-se os casos limites de uso dos isoladores, conforme a Tabela 5, e os respectivos vãos entre as torres para estes casos, e ainda mantendo-se constante a tensão mecânica no cabo (5692,5kgf), foi feita uma análise da quantidade de torres necessárias para a linha de transmissão hipotética deste estudo de caso, a qual inclui, também, a quantidade de isoladores e os pesos associados. Os resultados estão apresentados na Tabela 6, onde o percentual apresentado na quarta coluna é referente aos valores do Polimérico em relação aos valores de Porcelana.

A cadeia de discos de porcelana da Tabela 6 é composta por 34 discos de 255mm de diâmetro cada, pois o número de isoladores em uma cadeia, para isoladores de porcelana de 255mm de diâmetro, é dado conforme a Equação (5) (MAMEDE, 2013).

Tabela 6 - Comparação entre as linhas de transmissão.

	Porcelana	Polimérico	Percentual
Vão [km]	0,504	1,013	200,99%
Número de torres na linha de transmissão	993	494	49,74%
Tipo de isolador	Cadeia de 34 discos	Único	-
Número de isoladores por torre	6	6	100%
Número total de isoladores na linha de transmissão	5958	2964	49,74%
Massa do isolador [kg]	214,2	22,8	10,64%
Massa dos isoladores na torre [kg]	1285,2	136,8	10,64%
Massa total dos isoladores na linha de transmissão [kg]	1276203,6	67579,2	5,29%

Fonte: o autor.

$$N_i = w \cdot V_{ff} \quad (5)$$

onde  $N_i$  é o número de isoladores,  $w$  é uma constante que vale 0,0666 [1/kV] e  $V_{ff}$  é a tensão nominal entre fases [kV].

Assim, uma linha de transmissão de 500kV deve ter 34 isoladores de discos de porcelana em cada cadeia, pois:

$$N_i = 0,0666 \cdot 500 = 33,3 \cong 34 \text{ unidades}$$

Na Tabela 6, o número de torres na linha de transmissão é calculado pela divisão do comprimento da linha (500km) pelo valor do vão, e somando-se 1 ao resultado. O número de isoladores por torre é devido aos 2 circuitos de 3 fases cada. O número total de isoladores na linha de transmissão é calculado multiplicando-se o número de torres na linha de transmissão pelo número de isoladores por torre. A

massa dos isoladores na torre é obtido multiplicando-se a massa do isolador pelo número de isoladores por torre, e a massa total dos isoladores na linha de transmissão é obtido multiplicando-se a massa dos isoladores na torre pelo número de torres na linha de transmissão.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas características sobre os materiais cerâmicos, poliméricos e compósitos, informações sobre os isoladores de tensão de cerâmica e poliméricos (bom como comparações entre eles) e um estudo de caso envolvendo a diferença entre linhas de transmissões, no que diz respeito à escolha do tipo de isolador.

Concluiu-se que materiais compósitos sintetizados artificialmente com a junção de mais de um material podem ter características superiores se comparadas às características individuais dos materiais constituintes deste compósito. Sendo assim, esta tecnologia é usada em isoladores poliméricos, onde estes são até 41,11% mais leves se comparados aos isoladores de porcelana (tipo pilar), ou até 60,18% mais leves se comparados aos isoladores de porcelana (tipo suspensão), ao mesmo tempo que apresentam uma carga mecânica nominal 227,27% maior, se comparados aos isoladores de porcelana (tipo suspensão). Além do fato de que isoladores poliméricos apresentaram tensões elétricas suportáveis e disruptivas superiores em todos os ensaios deste tipo, e que podem ser usados em redes de distribuição compactas, as quais possuem menores dimensões e apresentam menos falhas devido ao fato dos condutores serem protegidos.

O estudo de caso mostrou que uma linha de transmissão que utiliza unicamente isoladores poliméricos de suspensão do modelo FXBW500 de 500kV fabricados pela Grantel pode ter até 49,74% menos torres, em comparação a uma linha que utiliza unicamente cadeia de discos de porcelana modelo 8022804 da Isoladores Santa Terezinha.

Também pode ser concluído que isoladores de tensão de cerâmica estão mais susceptíveis a atos de vandalismo, principalmente no que se refere a disparos de armas de fogo, visto que apresentam uma maior área sujeita ao disparo e são mais quebradiços e menos resistentes a estes atos. Também, isoladores de porcelana causam uma maior poluição visual na paisagem, visto que possuem maiores diâmetros, se comparados aos isoladores poliméricos, e que são de cor escura, o que causa maior contraste a um céu claro e azul, por exemplo.

Por outro lado, isoladores poliméricos podem apresentar falhas devido a uma má fabricação ou devido ao envelhecimento e perda de hidrofobicidade, o que ocasiona descarga externas que podem degradar o revestimento ou o núcleo.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

- Ensaio de laboratório com isoladores de porcelana e poliméricos para obtenção dos principais parâmetros e posterior comparação destes.
- Estudo acerca do impacto econômico a curto e longo prazo baseado na escolha do tipo de isolador (porcelana ou polimérico) no projeto de linhas de transmissão ou de sistemas de distribuição.
- Pesquisa frente às companhias transmissoras e distribuidoras sobre os motivos das escolhas do tipo de isolador em seus sistemas elétricos.
- Pesquisa em companhias elétricas, agências, órgãos públicos, universidades, centros de pesquisas, etc. sobre a existência ou inexistência de estudos comparativos entre isoladores de porcelana e poliméricos.

## REFERÊNCIAS

ALI EXPRESS. **Loja On-Line**. Disponível em: <<http://pt.aliexpress.com/cheap/cheap-porcelain-insulator.html>>. Acesso em: 20 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422**: projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. [S. L], 1985.

BALESTRO ISOLADORES. **Catálogo Balestro IPB Poliméricos Alta Tensão**. Disponível em: <[http://www.balestro.com/\\_web/arquivos/Cat%C3%A1logo%20IPB-AT%2010-12.pdf](http://www.balestro.com/_web/arquivos/Cat%C3%A1logo%20IPB-AT%2010-12.pdf)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

BEZERRA, F. V. C. **Projeto Eletromecânico de Linhas Aéreas de Transmissão de Extra Alta Tensão**. 89 f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARVALHO, J. A. Y. **Blindagem Balística de Compósito Polimérico Contra o Vandalismo e Proteção UV para Cadeias de Isoladores de Vidro em Linhas de Transmissão**. 129 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

CEEE-D. **Padronização de Distribuição**: Estruturas para Redes de Distribuição Aérea com Cabos Cobertos Fixados em Espaçadores. [S. L], 2012.

COSER, E. **Caracterização da Borracha de Silicone Utilizada em Isoladores para Rede Elétrica**. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

EMD ELECTRIC MATERIAL DISTRIBUIDOR. **Produtos**. Disponível em: <http://www.emd.com.br/modules.php?name=Conteudo&pid=139>>. Acesso em: 26 out. 2016

FRONTIN, S. de O. **Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão**, 1ª edição. Brasília: Inova, 2010.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**. Vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 1977.

GERMER ISOLADORES. **Catálogo 2015**. Disponível em: <http://www.germerisoladores.com.br/lmgs/Germer-Catalogo-2015.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

GRANTEL. **Catálogos de Isoladores Compostos de Suspensão**. Disponível em: <http://grantequipamentos.com.br/wp-content/uploads/2015/02/isoladores-compostos-def.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

GRIFFTHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**, 3ª edição. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

ISOLADORES SANTA TEREZINHA. **Catálogo Oficial CST**. Disponível em: <http://www.cst-isoladores.com.br/portal/sites/default/files/CATALOGO%20OFICIAL%20CST.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2016.

JANSSEN, F. **Influência dos Parâmetros de Envelhecimento nas Propriedades Elétricas de Isoladores Cerâmicos para Sistemas de Potência**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Núcleo de Pós-Graduação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2005.

LISBOA, M. B. *et al.* Análise de Falha em Isolador Polimérico. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p. 811-818, nov. 2011.

MADE-IN-CHINA. **Portal de Relacionamentos Profissionais**. Disponível em: <<http://jgtrade1.en.made-in-china.com>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MENDONÇA, P. L. de. **Diagnóstico de Falhas Elétricas e Mecânicas em Isoladores Compósitos de Classe de Tensão de 69kV Através de Radiografia Computadorizada**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

ORIENT POWER. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.composite-insulator.com>>. Acesso em 12 nov. 2016.

PÉ DE FIGUEIRA. **Portal de Notícias**. Disponível em: <<http://www.pedefigueira.com.br/cidade,5776,tiros-podem-ter-quebrado-isoladores-em-ato-de-vandalismo>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

PRYSMIAN. **Cabos Nus de Alumínio com Alma de Aço**. Disponível em: <[http://br.prysmiangroup.com/br/files/aluminio\\_caa.pdf](http://br.prysmiangroup.com/br/files/aluminio_caa.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2016.

SCHMIDT, W. **Materiais Elétricos**, 2ª edição. Volume 2 – Isolantes e Magnéticos. São Paulo: Blucher, 1979.

THOMAZINI, D. **Classificação da Hidrofobicidade em Isoladores Elétricos Poliméricos de Alta Tensão**. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.