Campus de São Carlos

**CRUZETAS PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA À BASE DE POLIPROPILENO**

Autor: José Francisco Resende da Silva

Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 02 / 04 / 03

Ass.:

**CRUZETAS PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA À BASE DE POLIPROPILENO**

José Francisco Resende da Silva

Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043567

Class.	TESE-EESC
Cott.	5487
Tombo	T192/03
Sysno	132.6359

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

S586c Silva, José Francisco Resende da
Cruzetas para redes de distribuição de energia
elétrica à base de polipropileno / José Francisco
Resende da Silva. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área : Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Correa Altafim.

1. Cruzetas poliméricas. 2. Cruzetas em
polipropileno. 3. Cruzetas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ FRANCISCO RESENDE DA SILVA**

Dissertação defendida e julgada em 06-05-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Tit. **RUY ALBERTO CORRÊA ALTA FIM** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. **JOÃO SINÉZIO DE CARVALHO CAMPOS**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profª. Assoc. **MARIA DO CARMO CALJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

A Amanda, minha filha,
Selma, minha esposa,
e meus pais,
que souberam compreender
minha ausência,
dando sempre o seu fundamental apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela amizade e dedicação durante a orientação para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da Elektro: Alex Silveira, Wilson Hirakawa, Fulvio Marcondes Machado, Clarice Itokazu, Armando José Benvenuti, Juracy Pereira Mamede, Anis Abdelnor, Luis Antonio Alves Cunha e Francisco Alfredo Fernandes, pela fundamental colaboração durante os estudos e a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Francisco Henrique da Silva e Miriam Resende da Silva, aos meus irmãos, Marco Antonio Resende da Silva e Paulo Cesar Resende da Silva, por todo apoio e confiança.

À minha esposa, Selma Cristina P. M. Resende da Silva, e minha filha querida, Amanda P. M. Resende da Silva, que souberam compreender meus muitos momentos de ausência.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, pela colaboração.

A todos os colegas da Elektro, que sempre me incentivaram para que eu concluísse este trabalho.

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
Lista de Figuras.....	i
Lista de tabelas.....	iii
Lista de abreviaturas e siglas.....	iv
Lista de símbolos.....	v
Resumo.....	vi
Summary.....	vii
CAPÍTULO 1 – Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1. Sistemas de Distribuição de Energia	5
2.1.1. Redes Nuas.....	6
2.1.2. Redes Protegida Compacta.....	11
2.1.3. Rede com cabos Pré-reunidos de Média tensão.....	15
2.1.4. Redes utilizando Isoladores Tipo Pilar.....	17
2.1.5. Sistemas MRT.....	18
2.1.6. Redes Subterrâneas.....	19
2.1.7. Comparativos de Custos entre Redes de Distribuição.....	21
2.1.7. Tendência de Implantação de Sistemas de Distribuição no Brasil.....	22
2.2. Polímeros e Aplicações em Sistemas Elétricos.....	22
2.2.1. Resinas.....	23
2.2.2. Termoplásticos e termofixos.....	23
2.2.3. Comportamento mecânico.....	24
2.2.4. Definição de polimerizações.....	26
2.2.5. Transições térmicas dos polímeros.....	26
2.2.6. Propriedades dos polímeros.....	30
2.2.7 Os Aditivos e suas funções.....	36
2.2.8 Polímeros em Sistemas de Elétricos.....	42
CAPÍTULO 3 – Seleção dos Polímeros para Confeção de Cruzetas.....	44
CAPÍTULO 4 – Simulação Mecânica, Ensaio Elétrico e Viabilidade Econômica.....	50

4.1. Simulação Mecânica.....	50
4.1.1. Requisitos de Projeto.....	52
4.1.2. Metodologia utilizada na Simulação Mecânica.....	54
4.1.3. Simulação computacional de esforços mecânicos na Cruzeta.....	55
4.1.4. Resultados das Simulações.....	59
4.1.5. Discussão dos Resultados das Simulações.....	62
4.1.6. Conclusão das Simulações.....	65
4.2. Obtenção das Placas para Ensaios Elétricos.....	66
4.3. Ensaios Elétricos.....	68
4.3.1. Placas de Polietileno.....	68
4.3.2. Placas de Polipropileno.....	70
4.3.3. Conclusão dos Ensaios Elétricos.....	72
4.4. Análise Econômica do Material SG616.....	72
4.4.1. Preços dos Materiais.....	73
4.4.2. Custo do Atendimento de Ocorrência não Programada.....	73
4.4.3 Cálculos – Viabilidade Econômica.....	73
CAPÍTULO 5 – Conclusão.....	76
ANEXO A – Definição de Sistemas de Distribuição de Energia	78
ANEXO B – Gráficos de rigidez dielétrica, resistividade volumétrica e constante dielétrica de alguns polímeros.....	79
ANEXO C – Critérios para o desenvolvimento das equações (3.1) e (3.2) e Planilha com os Parâmetros dos Polímeros.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
Figura 2-1. Usina hidrelétrica Marmelos – Minas Gerais.....	6
Figura 2-2. Largo da Pólvora-Belém – Pará.....	7
Figura 2-3. Estrutura Básica para Construção de Sistemas Aéreos no Brasil.....	8
Figura 2-4. Rede Aérea Nua.....	8
Figura 2-5. Especificação de Cruzeta - Elektro – Eletricidade e Serviços SA.	11
Figura 2-6. Formato estrutural de rede compacta com circuito duplo	12
Figura 2-7. Espaçador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.....	12
Figura 2-8. Separador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.....	13
Figura 2-9. Rede protegida compacta e rede com condutores nus.....	13
Figura 2-10. Rede Aérea com cabo pré-reunido de média tensão.....	15
Figura 2-11. Rede Aérea – Estrutura com isolador tipo pilar.....	17
Figura 2-12. Rede Aérea – Estruturas para MRT.....	18
Figura 2-13. Fotografia comparativa de condomínio com rede convencional nua e rede subterrânea.....	20
Figura 2-14. Cadeias com baixa densidade de ligações cruzadas.....	25
Figura 2-15. Ação do Plastificante.....	37
Figura 2-16. Produção de cruzeta em Fibra de Vidro.....	43
Figura 4-1. Geometria e dimensões da cruzeta simulada computacionalmente.....	52
Figura 4-2. Cruzeta com 10mm de parede, Cruzeta com 15 mm de parede e cruzeta com 10 mm de parede com reforço central em X.....	53

Figura 4-3. Visão frontal dos esforços aplicados à cruzeta para análise por elementos finitos.....	53
Figura 4-4. Visão tridimensional dos esforços aplicados à cruzeta, para análise por elementos finitos.....	54
Figura 4-5. Malha em casca original.....	58
Figura 4-6. Malha em casca refinada 1 e Malha em casca refinada 2.....	58
Figura 4-7. Malha em casca sem furos e em casca sem furos refinada	58
Figura 4-8. Comparação entre malha em casca original e sólida para o modelo de 10 mm.....	59
Figura 4-9. Resultados de tensão máxima para todos os casos.....	62
Figura 4-10. Distribuição de tensões para os casos 4 e 10 na região do topo no centro da peça.....	63
Figura 4-11. Comparação dos casos 2, 4, 6.....	64
Figura 4-12. Placas confeccionadas para uso nos ensaios de rigidez dielétrica.	67
Figura 4-13. Placas confeccionadas para uso nos ensaios de Trilhamento.....	68

LISTA DE TABELAS

	<i>Página</i>
Tabela 2-1. Tabela de resistência mecânica das Cruzetas de madeira.....	10
Tabela 2-2. Comparativo de custo modular por tipo de rede.....	21
Tabela 2-3. Transição térmica dos polímeros.....	29
Tabela 3-1. Notas das Características dos Polímeros.....	46
Tabela 3-2. Abreviatura das características dos polímeros.....	48
Tabela 3-3. Tabela com o resultado do cálculo das notas das características dos polímeros.....	49
Tabela 4-1. Volume e massa das cruzetas simuladas.....	53
Tabela 4-2. Casos analisados computacionalmente para as configurações de cruzetas com paredes de 10 mm, 15 mm e 10 mm com X central.....	57
Tabela 4-3. Resultado de tensão e deslocamento para a cruzeta de 10 mm de parede.....	60
Tabela 4-4. Resultado de tensão e deslocamento para a cruzeta de 15 mm de parede.....	61
Tabela 4-5. Resultado de tensão e deslocamento para a cruzeta de 10 mm de parede com X central.....	61
Tabela 4-6 - Resultados dos ensaios do Polietileno.....	69
Tabela 4.7. Resultados dos ensaios do Polipropileno (SG 616).....	71
Tabela 4.8 Dados sobre cruzetas – Preço e Vida Útil.....	73
Tabela 4.9 Dados financeiros sobre cruzetas ao longo de 20 anos.....	74
Tabela 4.10 Valores presentes para a cruzeta de madeira.....	74
Tabela 4.11 Valores presentes para a cruzeta de madeira e de Polipropileno (SG 616).....	75
Tabela 4.12 Resultado financeiro da aplicação da Cruzeta de Polipropileno x Madeira.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
NBI	Nível Básico de Impulso
CSPE	Comissão de Serviços Públicos de Energia
DEC	Duração Equivalente de Interrupção – Horas Ano
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Cliente
SBR	Resina estireno-butadieno;
EPDM	Copolímero de etileno-propileno-monômero dieno;
EPS	Poliestireno expandido;
HDPE	Polietileno de Alta densidade;
IEE	Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP
PEAD	Polietileno de Alta densidade;
MRT	Monofásico com retorno por terra
NBR	Norma Brasileira
PA 6.6	Poliamida - Nylon
PET	Poli (tereftalato de etileno);
PE	Polietileno;
PP	Polipropileno;
PTFE	Politetrafluoretileno;
PU	Poliuretano;
PVC	Poli (Cloreto de Vinila);
SG616	Polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro

LISTA DE SIMBOLOS

σ	Resistência a flexão
i	Valor percentual do retorno de investimento desejado (Mensal ou anual)
F	Valores de Força Aplicada
GRP	Poliéster reforçado com fibra de vidro
L	Afastamento entre apoios/Comprimento
N	Newton – Unidade de medida de Força
n	Número de anos (se i da equação 4.1 for em anos) ou Número de meses (se i da equação 4.1 for em meses)
Pa	Pascal – Unidade para medida de tensão
Rat	Resistência de Aterramento
V	Volt
V_{final}	Valor monetário no ano desejado
TDI	Isocianato aromático
rd	Rigidez dielétrica
ri	Resistência ao Impacto
vp	Valor da propriedade do polímero
r	Reciclabilidade
map	Maior valor da propriedade entre os Polímeros
mep	Menor valor da propriedade entre os Polímeros
me	Módulo de elasticidade
Kgf	Quilograma força
MPa	Mega pascal
Tg	Temperatura de transição vítrea
Tm	Temperatura de fusão cristalina
X	Halogênio

RESUMO

A melhoria da qualidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica, a redução de seus custos operacionais e a harmonia com o meio ambiente têm norteado os pesquisadores na busca de novos elementos estruturais. Este processo também permite que as companhias distribuidoras de energia conheçam todas as fases dos produtos adquiridos, desde a compra da matéria prima até sua produção final

As cruzetas de madeira, um dos principais elementos estruturais dos sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica no Brasil, vêm apresentando acelerada degradação, reduzindo sobremaneira suas características mecânicas, ocasionando sua quebra ou troca por manutenção. Quando da quebra desse elemento estrutural, sérios transtornos podem ser observados tanto para as concessionárias quanto para os seus clientes, inclusive desligamentos inesperados.

Assim, melhorar o NBI (Nível Básico de Impulso), substituir madeiras nativas e em extinção por materiais recicláveis, aumentar a vida útil das cruzetas constitui num dos principais objetivos das empresas distribuidoras de energia e também do mercado.

Este trabalho vem de encontro a esses anseios, apresentando toda uma metodologia para o uso do polipropileno na construção de elementos estruturais tanto mãos francesas quanto cruzetas. Também serão apresentados simulações mecânicas, ensaios elétricos e cálculos de viabilidade econômica.

SUMMARY

The researchers that seek new materials for components of the electric power systems look for those that assist to the following requirements: better quality, lower operational prices and harmony with the environment.

It is very important that the distributor company of energy knows the product, from the purchase of the matter to its application in the net.

The crossarms used in Brazil are mostly of wood. They suffer strong degradation and in short time it happens the bankruptcy of its mechanical characteristics. As consequence, they break or are changed for maintenance. The break of that structural element provokes serious upset for the concessionary and their customers, that can be reached by unexpected disconnection.

For the substitution of the current wood crossarms, the distributor company of energy and the market look for to improve the BIL " Basic Impulse Level", to reduce the use of the native wood replacing it by recycling materials, and to increase the useful life of the crossarms.

This work presents the methodology for the choice of the polipropileno, the mechanical simulations, the electric tests and a calculation of economical viability of that material, to demonstrate its applicability.

CAPÍTULO 1

Introdução

As interrupções que atingem o sistema elétrico são oriundas de diversos eventos naturais e acidentais. As interrupções provocam grandes perdas para as concessionárias e para os seus clientes. Deve-se, portanto, pesquisar formas de minimizar estes impactos, através de estudos que promovam o surgimento de novos materiais, novas composições ou até mesmo novas estruturas para os sistemas de distribuição de energia elétrica.

Inserindo-se no sistema elétrico, materiais com qualidade assegurada, durabilidade superior aos existentes e com capacidade de um melhor isolamento da rede aérea, contribui-se para a redução do DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor) e do FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor) nestes sistemas e conseqüentemente diminui-se os custos operacionais das distribuidoras de Energia Elétrica. Além do que, as concessionárias de energia elétrica são obrigadas pela portaria n.º 46 de 17 de abril de 1978 [1] a apurar os níveis de qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica entregue a seus clientes. A falha no cumprimento de metas estabelecidas entre os órgãos reguladores e as concessionárias pode gerar multas às mesmas.

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica, tem-se uma quantidade muito grande de cruzetas de madeira e suas substituições anuais atingem patamares de milhares de unidades. As cruzetas existentes atualmente devem, de acordo com a norma Elektro, ser de madeira puro cerne ou cerne-alburno seca: Ipê, Jatobá, Sucupira, Faveiro, Cabreúva, Aroeira, Roxinho, Angico Preto e outras madeiras duras [2] [3]. A utilização destas madeiras sofre restrições ambientais pela

legislação vigente [4], e a cada dia que passa se torna mais difícil obter madeiras que tenham uma durabilidade aceitável para as redes de distribuição.

Em levantamento efetuado recentemente, constatou-se que as cruzetas atualmente entregues à Elektro – Eletricidade e Serviços SA e aplicadas às redes de distribuição de energia elétrica têm durabilidade inferior a 5 anos [5]. Durante a sua instalação, já são perceptíveis deficiências das cruzetas; porém, as mesmas passam nos ensaios determinados em norma. Além dos custos operacionais de substituição da cruzeta, há um processo de revisão organizacional nas distribuidoras de energia elétrica que faz com que cada vez mais, os recursos estejam muito bem dimensionados para execução das tarefas, e cada vez mais estes recursos são cobrados por eficiência e produtividade, portanto, materiais com durabilidade baixa tornam os custos operacionais muito altos, colocando em risco as revisões organizacionais já efetuadas.

Neste contexto, este trabalho objetiva o desenvolvimento de uma cruzeta polimérica, com características de durabilidade, rigidez mecânica e elétrica, compatíveis com as normas e ser ecologicamente compatível, permitindo inclusive a reciclagem de seus materiais. Os polímeros usados como materiais isolantes desde o século passado [6], tem sido nos últimos tempos extensamente empregados na área de energia, desde a coberturas de cabos a peças de sustentação para redes protegidas compactas. Devido a sua grande quantidade e diferenças físico-químicas, para esta pesquisa, sua seleção seguiu a metodologia abaixo:

- Avaliou-se a classe dos materiais a serem escolhidos, foram selecionados os polímeros;
- Foram selecionados dez polímeros comerciais, que foram analisados segundo as exigências para construção de cruzetas, ou seja, resistência mecânica, resistência ao impacto e raios ultravioleta, estabilidade química, reciclabilidade, propriedades elétricas, processo produtivo e tempo de cura e acabamento superficial.
- Dois desses polímeros foram escolhidos para serem simulados mecanicamente através da técnica dos elementos finitos.

- Das simulações mecânicas, dois foram ensaiados eletricamente. Recaindo no composto SG616 os melhores resultados para a construção da cruzeta.

Alguns fatores destacam a importância do desenvolvimento deste trabalho:

- utilização de um material reciclável em substituição à madeira retirada de florestas. Desta forma harmoniza-se as ações humanas com o meio ambiente;
- Matéria prima e processo produtivo 100% nacionais, reduzindo o impacto das importações;
- Melhora no NBI (Nível Básico de Impulso), na durabilidade e confiabilidade das estruturas;
- Redução de custos operacionais para as concessionárias;
- Redução de interrupções provocadas por falhas em cruzetas;
- Excelentes propriedades elétricas do composto SG616 (Polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro);

Com o desenvolvimento deste trabalho, alcançou-se um grande avanço no aumento do NBI das estruturas, aumento de vida útil das cruzetas e conseqüentemente uma redução no número de ocorrências associadas à falha deste importante elemento de sustentação estrutural. As matérias primas utilizadas para a confecção da cruzeta tem uma durabilidade maior (devido aos aditivos associados em sua composição), são recicláveis, proporcionando ao fim de sua vida útil, um retorno de capital com a venda desse material retirado da rede ou o seu reaproveitamento no mesmo processo produtivo. As análises efetuadas dão base para estimar que estes novos materiais tenham uma vida média de aproximadamente vinte anos.

A redação desta dissertação foi dividida em cinco capítulos, conforme segue.

No capítulo 2 fez-se uma análise bibliográfica sobre a energia elétrica no Brasil, cruzetas, sobre os polímeros, sobre as redes de distribuição e as tendências de construção de sistemas de distribuição de energia no Brasil.

No capítulo 3 serão apresentadas a metodologia de seleção dos polímeros bem como a escolha dos dois melhores polímeros para simulações mecânicas e ensaios elétricos.

No capítulo 4 apresenta-se as simulações mecânicas da cruzeta construída computacionalmente, para uso na rede de distribuição de energia elétrica, os resultados dos ensaios elétricos dos 2 polímeros selecionados, a definição do polímero para a construção da cruzeta e análise de viabilidade econômica.

Finalmente, no capítulo 5 conclui-se este trabalho, com base nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica dos principais temas abordados neste trabalho. Serão abordados alguns dos principais tipos de construção de redes de distribuição, informações sobre as cruzetas utilizadas em sistemas aéreos de distribuição de energia, uma explanação sobre custos comparativos de algumas redes e informações sobre os polímeros e suas aplicação em eletricidade.

2.1. Sistemas de Distribuição de Energia.

Algumas definições de um sistema de distribuição de energia encontram-se no Anexo A.

As décadas finais do século XIX foram marcadas por importantes e profundas transformações na sociedade brasileira, sendo o palco da introdução do uso da eletricidade em nosso país. No início, seu principal uso era na área de iluminação e transportes urbanos.

Um marco histórico na produção de energia no país foi a construção da Usina Hidrelétrica de Ribeirão do Inferno, em 1883, destinada aos serviços de mineração em Diamantina, Minas Gerais, movimentando bombas d'água para desmonte de terreno diamantífero. Em 5 de setembro de 1889, foi implantada a usina hidrelétrica de Marmelos, no rio Paraibuna, em Juiz de Fora, considerada o “marco zero” da história do setor de energia elétrica brasileiro e da América Latina por ter sido a primeira unidade de geração hidrelétrica construída especificamente para o atendimento de serviços públicos urbanos [7], ver foto 2-1.

Figura 2-1 – Usina hidrelétrica Marmelos – Minas Gerais

Os sistemas de distribuição de energia apresentam diversos formatos construtivos, cada um selecionado segundo quesitos econômicos, estético, meio ambiente, relevo, tipos de construção e necessidades do cliente.

Nos próximos itens, serão abordados alguns tipos construtivos de redes de distribuição utilizados no Brasil e no mundo, destacando-se os abaixo relacionados:

- Redes Nuas
- Rede Protegida Compacta
- Rede Isolada – Pré-reunido de média tensão
- Redes utilizando isoladores tipo Pilar
- Redes MRT (Monofásicas com Retorno por Terra)

2.1.1 Redes Nuas.

A distribuição de energia elétrica desde o início da eletrificação de nossas cidades, usa diversos tipos de construção para o seu transporte, como por exemplo, as cruzetas para suporte dos isoladores e cabos de energia (ver detalhe do Largo da Pólvora, em Belém do Pará no século XIX).

Figura 2-2 – Largo da Pólvora Belém - Pará

Atualmente, as normas brasileiras NBR-5433 [8] e NBR-5434 [9], especificam as formas de empregar as cruzetas de madeira ou cruzetas de concreto. Na figura 2.3, encontram-se ilustrada uma estrutura básica para sistemas aéreos de distribuição, e na figura 2.4, o seu emprego em uma rede de distribuição aérea na área de concessão da Elektro - Eletricidade e Serviços SA . Pode ser visto também nesta foto, o aspecto técnico construtivo de uma rede de distribuição e a importância do desempenho da cruzeta, que devem garantir a sustentação dos cabos sem que toquem nas estruturas aterradas ou no solo.

Figura. 2-3 – Estrutura Básica para Construção de Sistemas Aéreos no Brasil

Figura 2-4 – Rede aérea nua

Desta forma podemos definir uma cruzeta como sendo, “peça de madeira sensivelmente retilínea, sem emendas, destinada a suportar condutores e equipamentos de redes aéreas de distribuição de energia elétrica” [10].

As cruzetas dos atuais sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil são produzidas a partir da madeira e concreto armado. As cruzetas de madeira

representam quase que a totalidade de cruzetas instaladas em uso no país, cujos padrões são muito similares na maioria das concessionárias distribuidoras de energia.

Do ponto de vista de NBI (Nível Básico de Impulso), as cruzetas de madeira se destacam face às de concreto e metal, por proporcionar um melhor isolamento e facilitarem a extinção dos arcos elétricos, quando ocorrem sobretensões.

Um exemplo do comportamento do NBI em uma estrutura com cruzeta de ferro e uma com cruzeta de madeira, pode ser obtido:

- Quando da utilização da cruzeta de ferro, nesse caso o NBI da rede fica limitado ao do isolador, ou seja, próximo dos 100 kV e, para que se possa alcançar os 300 kV recomendados pela norma, seria necessário instalar um conjunto de 3 pára-raios a cada 300 metros de rede com resistência de aterramento $R_{at} \leq 200 \, \Omega$ com a troca dos 3 isoladores de 15 kV das estruturas pelos de 25 kV.
- No caso, da utilização de cruzetas de madeira, o NBI da rede fica limitado pelo valor da fase B, devido ao pino do isolador estar mais próximo da mão francesa e isto implica em um NBI em torno de 109 kV, tendo as demais fases um valor superior a 300 kV. Portanto para alcançar os mesmos 300 kV recomendados pela norma, seria necessário instalar um pára-raio na fase B a cada 300 metros de rede com uma resistência de aterramento $R_{at} \leq 100 \, \Omega$ o que reduz os custos da instalação anterior.

Quanto à suportabilidade mecânica, as cruzetas de madeira devem atender à norma NBR 8458 [10], conforme tabela 2.1 abaixo:

Tabela 2-1 – Tabela de resistência mecânica das Cruzetas de madeira.

Comprimento L (mm)	Ensaio Conforme	Descrição do Carregamento	Resistência F (daN)	Flecha (mm)	
				Máxima	Residual Máxima
2000	Figura 1 A	Nominal	400	75	3
		Máximo Excepcional	560	100	5
		Mínimo de Ruptura	800	-	-
2400	Figura 1 A	Nominal	400	115	5
		Máximo Excepcional	560	163	8
		Mínimo de Ruptura	800	-	-
5000	Figura 1 B	Nominal	400	95	4
		Máximo Excepcional	560	132	7
		Mínimo de Ruptura	800	-	-
6000	Figura 1 B	Nominal	400	140	6
		Máximo Excepcional	560	200	10
		Mínimo de Ruptura	800	-	-

Nestas situações, observando-se os aspectos técnicos e econômicos, há uma tendência ao uso de cruzetas de madeira de puro cerne ou cerne alburno seca [11]. Entretanto, segundo as leis ambientais de nosso país, as madeiras retiradas de florestas são proibidas para esta finalidade, sendo em muitos vezes extraídas de forma ilegal.

Desta forma, as cruzetas atualmente oferecidas no mercado encontram-se nos limites das normas, apresentando vida útil de até 5 anos [5]. Cruzetas com baixo desempenho mecânico e curta vida útil, podem provocar desligamentos indesejados no sistema. Tais desligamentos são monitorados pelos órgãos reguladores, sendo que cada concessionária tem padrões de tempo e quantidade de desligamento que podem ocorrer em suas áreas de concessão ao longo de um ano.

O governo federal, através de sua agência reguladora ANEEL e o governo estadual, através da CSPE, regulamentam os índices de DEC (Duração Equivalente por Consumidor – Em horas por ano) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Cliente – Em número de Interrupções por ano) das concessionárias [1].

Os valores de DEC e FEC são calculados em função das interrupções que ocorrem no sistema elétrico. Estes indicadores refletem a qualidade e continuidade dos serviços prestados pelas concessionárias a seus clientes.

Desta forma, as concessionárias desenvolvem estudos que permitam a redução dos desligamentos indesejáveis em suas redes e conseqüentemente dos indicadores DEC e FEC.

Na figura 2.5, tem-se um desenho do formato da cruzeta de madeira e sua respectiva furação segundo especificação da Elektro [2].

Figura 2-5 . Especificação de Cruzeta – Elektro – Eletricidade e Serviços S.A

Outras formas de redes aéreas foram sendo propostas ao longo dos anos tanto no Brasil, quanto no exterior. Nos tópicos subsequentes algumas delas serão descritas e analisadas quanto a sua aplicabilidade.

2.1.2 – Rede Protegida Compacta

Por definição rede protegida compacta é “uma rede que emprega cabos protegidos numa configuração compacta, separados por espaçadores poliméricos em formato losângular e sustentados por um cabo mensageiro” [12]

Os cabos são de alumínio ou cobre dotado de cobertura protetora de composto extrudado de polímero termofixo ou termoplástico, cuja cobertura tem a função de reduzir a corrente de fuga em caso de contato do cabo com objetos aterrados e diminuir o espaçamento entre condutores.

Na figura 2.6, está representado o formato de uma rede protegida compacta utilizada no Brasil.

Figura 2.6 - Formato estrutural de rede compacta com circuito duplo

Além dos cabos, que têm a sua isolação constituída de materiais poliméricos, há polímeros também nos espaçadores e separadores e seus formatos podem ser visualizados nas figuras 2.7 e 2.8.

Figura 2.7 - Espaçador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.

As fases A, B e C apresentadas na figura 2.7 representam a notação adotada para representar o defasamento angular entre os três condutores. O espaçador é um acessório de material polimérico de formato losângular cuja função é a sustentação e separação dos cabos protegidos na rede compacta ao longo do vão, mantendo o isolamento elétrico da rede.

Figura 2.8 - Separador para sustentação de cabos em rede protegida compacta.

O separador é um acessório de material polimérico de formato vertical, cuja função é a sustentação e separação dos cabos protegidos na rede compacta, em situações de conexões entre fases (“flying-tap”), mantendo o isolamento elétrico da rede [12].

A figura 2.9 mostra duas redes de distribuição de energia. À esquerda, pode-se ver uma rede protegida compacta e à direita, uma rede aérea com condutores nus.

Figura 2.9 - Rede protegida compacta e Rede com condutores nus.

A rede protegida compacta apresenta um conforto visual melhor do que as redes com condutores nus. Outro aspecto interessante nesta figura é a confirmação de um dos fatores que influenciam a sua aplicação, ou seja, a arborização intensa. Nestes locais, o toque dos cabos com a arborização pode ocorrer desde que seja eventual e não permanente.

O uso da rede compacta se aplica nas seguintes situações:

- Regiões arborizadas, pela maior confiabilidade deste tipo de rede ao toque de galhos de árvores, por permitir menor área de podas e possibilitar um maior espaçamento na periodicidade das poda de árvores, além do cabo mensageiro servir como proteção da rede contra a queda de galhos;
- Áreas com freqüentes ações de vandalismo; neste caso, a implantação da rede protegida compacta deve ser somente nos trechos em que é detectado vandalismo;
- Locais com congestionamento de circuitos, pela possibilidade de instalação de até 4 (quatro) circuitos na mesma estrutura, principalmente em saídas de subestações;
- Circuitos onde se exige um alto índice de confiabilidade devido às características dos consumidores especiais;
- Locais com redes próximas às edificações;
- Locais com grande incidência de descargas atmosféricas;
- Em áreas rurais próximas a vegetação preservada por lei.

Não é recomendada a rede protegida compacta em regiões litorâneas e zonas industriais poluídas (locais de atmosfera agressiva) pelo fato de empregar cabo protegido não isolado que, sob presença de contaminação, passa a conduzir correntes superficiais na cobertura polimérica, causando o fenômeno de trilhamento elétrico (“tracking”) [12]. Para estas situações, devem ser estudadas soluções alternativas para cada caso específico, como as opções abaixo:

- Elevação do nível básico de impulso da rede (NBI), mantendo-se a configuração compacta;
- Mudança para rede isolada.

Pode-se elencar alguns aspectos de preocupação com este tipo de construção:

- Qualidade dos espaçadores e separadores. Se o fabricante cometer algum equívoco no processo produtivo, estes elementos importantíssimos para a sustentação mecânica, podem falhar e ocasionar sérios danos aos cabos e consequentemente desligamento do sistema.
- Seu custo é cerca de 1,3 vezes maior do que o de uma rede nua.

2.1.3 Rede com cabos Pré-reunidos de Média tensão

Uma alternativa para a construção de redes aéreas de distribuição é a aplicação de cabos pré-reunidos isolados [13]. Este tipo de aplicação aumenta a isolamento da rede (NBI), permitindo num mesmo poste haver mais circuitos do que numa rede nua convencional.

Observa-se na figura 2.10 o aspecto construtivo de uma rede com cabo pré-reunido de média tensão.

Figura 2.10 – Rede Aérea com cabo Pré-reunido de Média tensão

A aplicação de cabos pré-reunidos em sistema de distribuição aéreo, ocorrerá quando houver dificuldades locais para a instalação da rede aérea convencional, tais como [13]:

- locais com arborização intensa, onde deve ser preservada a ecologia, ou onde é proibida a poda de árvores;
- locais onde as ruas são estreitas e a rede aérea convencional acarrete problema de segurança com relação à proximidade de luminosos, marquises, janelas e sacadas das edificações;
- locais com alto índice de poluição ambiental salina e/ou industrial;
- ruas onde as estruturas estejam congestionadas e seja necessária a instalação de novos alimentadores; saídas de subestação, para evitar congestionamento de estruturas, com circuitos aéreos convencionais.

Ainda pode-se aplicar nas condições especiais seguintes [13]:

- Saída de subestação, como alternativa econômica à utilização de cabos subterrâneos.
- Travessias sob viadutos, linhas de transmissão, etc., como alternativa econômica à utilização de cabos subterrâneos.
- Travessias sobre rios, através de pontes, como alternativa técnica ao circuito aéreo convencional com estruturas especiais ou como alternativa econômica ao cabo subterrâneo.
- Quando a carga a ser alimentada justifique a aplicação do cabo pré-reunido, aumentando a confiabilidade do sistema.

Destacam-se abaixo os problemas encontrados neste tipo de construção:

- As emendas dos cabos: A maioria dos desligamentos ocorridos com este tipo de rede, são oriundos de problemas com os pontos de emenda do cabo. Isto ocorre devido a erros no processo de reconstituição do cabo nos pontos de emenda.
- Custo elevado. Seu custo é de 1,85 vezes maior do que o de uma rede nua

2.1.4 Redes utilizando isoladores tipo Pilar

Uma alternativa de construção de redes aéreas de distribuição é o uso de isoladores do tipo pilar.

A construção de redes aéreas com isoladores tipo pilar evita o uso de cruzetas para sustentação de cabos. Isto ocorre em função da instalação, destes isoladores, ser feita através do pino de fixação ao poste ou de suporte [14]. Seu principal problema são os pássaros, que fecham curto entre ferragens e cabos.

Pode-se observar a figura 2.11 onde estão as estrutura construtivas utilizando isolador tipo pilar.

Figura 2.11 – Rede Aérea – Estrutura com Isolador Tipo Pilar

2.1.5. Redes MRT (Monofásicas com Retorno por Terra)

Considerando a necessidade de compatibilizar os custos de implantação de sistemas de eletrificação rural com a economia das áreas a serem eletrificadas, os sistemas de redes monofilares com retorno por terra servem como opção de atendimento aos consumidores de baixa renda [15].

O sistema MRT aplica-se ao atendimento de consumidores em regiões ou áreas rurais com baixa densidade de carga que não exijam, a curto e médio prazo, interligação ou ampliação de sistemas elétricos [16].

Podem ser observadas na figura 2.12 as formas estruturais construtivas para os sistemas MRT.

Figura 2.12 – Rede Aérea – Estruturas para MRT

Apesar de seu custo mais baixo, há problemas graves com relação às proteções dos sistemas dos quais os MRT derivam. Para evitar-se que os sistemas fiquem desbalanceados, procura-se inserir cargas limitadas por fase do sistema trifásico.

Desta forma, por questões de proteção contra defeitos fase-terra, as cargas atendidas em MRT deverão ser balanceadas de maneira que, em qualquer ponto do alimentador (trancos, subtrancos e ramais trifásicos), a corrente residual ($I_N = I_A + I_B + I_C$) não ultrapasse 6A [15].

Quando a opção for pela construção de sistemas MRT, faz-se necessário um acompanhamento rigoroso das cargas instaladas em cada fase do sistema.

Um outro ponto de atenção é a análise da resistividade do solo, pois dela dependerá o retorno de corrente pelo solo. Se um aterramento for mal executado, corre-se o risco de morte de animais e pessoas.

2.1.6 Redes Subterrâneas

As redes subterrâneas caracterizam-se por apresentar índices de interrupção extremamente baixos e pela extinção da poluição visual das redes nuas.

São constituídas por construções civis associadas as montagens elétricas, sendo necessário providenciar a abertura de valas para a instalação de dutos, caixas de passagem, bases de concreto para equipamentos e compartimentos subterrâneos para instalação de equipamentos.

Este tipo de rede apresenta um alto custo de implantação, principalmente devido aos seguintes fatores:

- Necessidade de execução de obras civis (abertura de valas para instalação de dutos, caixas de passagem, bases de concreto para equipamentos, etc.);
- Utilização de materiais e equipamentos totalmente isolados e compatíveis com a tensão do sistema;
- Utilização, em algumas situações, de equipamentos submersíveis;
- Para facilitar a localização de defeitos, as redes subterrâneas são planejadas com recursos de alimentação por duas ou mais fontes, bem como instalação de chaves seccionadoras em pontos estratégicos para transferência de cargas.

- As redes subterrâneas (redes elétricas e obras civis) têm que ser projetadas para atender a um planejamento de longo prazo, pois o atendimento de necessidades de aumento de cargas e novas demandas, pelas características técnicas inerentes a cada uma das soluções, é menos flexível para a rede subterrânea do que para a aérea.
- Por provocar maiores transtornos no caso de intervenção na rede, substituição de equipamentos e condutores, construção de novos circuitos, etc.

Devido aos altos custos de implantação e de manutenção da rede subterrânea, este tipo de construção é recomendado para:

- Locais com alta densidade de carga (centros comerciais, alta concentração de prédios, etc.);
- Revitalização de centros urbanos;
- Cidades históricas;
- Condomínios residenciais de altíssimo padrão figura 2.13.

Figura 2.13 – Fotografia comparativa de condomínio com rede convencional nua (esquerda) e rede subterrânea (direita) [17]

As vantagens da implantação de uma rede subterrânea são apresentadas a seguir:

- Desempenho superior sob o aspecto de continuidade de fornecimento. Isto ocorre por serem menos susceptíveis a interferências do meio ambiente

(arborização, descargas atmosféricas, animais, etc.), abalroamento e vandalismos;

- Se projetada e construída adequadamente, a rede subterrânea requer menor número de intervenções de manutenção.

Apresenta-se a seguir as desvantagens da rede subterrânea:

- Maior dificuldade na localização de defeitos, provocando um aumento no tempo de desligamento;
- Custo de manutenção maior do que o da rede convencional nua, devido à necessidade de mão de obra com maior especialização e qualificação, utilização de equipamentos especiais e próprios para redes subterrâneas, reparo e obras civis.

2.1.7 Comparativo de custos entre Redes de Distribuição.

No Brasil, predomina a construção e manutenção de sistemas aéreos de distribuição com redes nuas. As áreas rurais apresentam o maior índice de utilização destas redes. Todas as grandes concessionárias de distribuição de energia no Brasil fazem uso de redes nuas. No Canadá a empresa BChydro atende a Colúmbia Britânica e faz uso de redes aéreas com instalação de cruzetas. O uso de cruzetas na Union Electric Company, empresa que atende o Noroeste dos Estados Unidos, também é motivo de estudos por parte de cientistas [18]

Portanto, observando-se os custos comparativos da tabela 2.2 de implantação das redes, verifica-se o porque no Brasil e no mundo, principalmente em países menos desenvolvidos, a utilização de redes aéreas com cruzetas ainda é vantajosa.

Tabela 2.2 –Comparativo de custo modular por tipo de rede.

Tipo de rede	Custo (Pu *)
Rede Nua (com cruzeta)	1,00
Rede Protegida Compacta	1,30
Rede Isolada – Pré-reunido de Média Tensão	1,85
Rede Subterrânea	7 a 13

* Pu (Por unidade monetária) - Os números foram calculados comparando-se com a rede nua - Fonte Elektro e Servel (Empresa especializada em projeto e construção de redes Subterrâneas) [19].

2.1.8 Tendências de Implantação de Sistemas de Distribuição no Brasil.

Os sistemas de distribuição de Energia elétrica no Brasil têm como principais formas construtivas as apresentadas nos itens anteriores. Os estudos e a melhoria na qualidade dos materiais, bem como o aumento do consumo, têm reduzido os custos de implantação de determinados tipos de redes.

Pode-se elencar as tendências de implantação de sistemas de distribuição de energia no Brasil conforme segue:

- Sistema de distribuição aéreo com uso de Rede Protegida Compacta: Utilizado em áreas urbanas e rurais. Custo apenas 1,3 vezes maior do que o das redes nuas [19]. Custo com tendência de redução. Este tipo de rede apresenta uma performance melhor do que as redes nuas, principalmente em regiões arborizadas.
- Redes subterrâneas: A utilização de redes subterrâneas ocorre em áreas urbanas, cidades históricas, revitalização de centros urbanos e condomínios de alto padrão. Sua grande desvantagem é o custo, que pode atingir patamares de 7 a 13 vezes maior do que o de uma rede nua [19]. Muito importante ressaltar que as redes subterrâneas apresentam uma menor vulnerabilidade do que as redes aéreas, conseqüentemente o número de interrupções é muito pequeno.
- Sistema MRT: Aplicável em áreas de baixo consumo e baixa renda. Para atendimento principalmente às propriedades rurais. Sua grande desvantagem é a limitação de carga instalada por fase, devido aos problemas que causa aos sistemas de proteção [15].

2.2 Polímeros e Aplicações em Sistemas Elétricos

Tendo em vista, facilitar o entendimento dos leitores, dos termos técnicos e da metodologia adotada, será feita uma breve descrição da história dos polímeros e de suas principais propriedades nos tópicos subsequentes.

O primeiro contato do homem com os polímeros deu-se através de materiais resinosos e graxas extraídas ou refinadas, durante a Antigüidade, com os egípcios e

romanos que usavam esses elementos para carimbar, colar documentos e vedar contêineres .

Mas a história do plástico realmente iniciou-se com a descoberta de numerosos materiais que atualmente são aplicados como tal no mundo inteiro.

Os tecnólogos só passaram a ter um domínio melhor sobre os materiais poliméricos com o surgimento da "Ciência dos Polímeros", na terceira década do século XX. No entanto, essa mesma ciência só veio apresentar um crescimento real décadas depois. No Brasil, os polímeros só surgiram na era da petroquímica, nos anos 70.

"A palavra polímero é de origem grega e significa muitas (poly) partes (meros). Assim, os polímeros são compostos constituídos por moléculas gigantes, as macromoléculas, obtidas pela associação de pequenas moléculas, os monômeros" [20]

Um polímero é uma macromolécula formada pela união de pequenas e simples unidades químicas (monômeros) constituindo um padrão repetitivo que resulta em cadeias longas (macromoléculas) que possuem, portanto, massa molecular elevada. A repetição pode ser de forma linear em alguns casos, ramificada, em outros, ou até mesmo resultar em uma estrutura dimensional.

2.2.1. Resinas

São basicamente substâncias segregadas pelos vegetais e caracterizadas como suas "exsudações naturais" ou restos fósseis. Constituem-se em substâncias amorfas de massa molecular intermediária ou alta, insolúveis em água, mas solúveis em alguns solventes orgânicos e que, à temperatura ambiente, são sólidos muito viscosos que amolecem gradualmente por aquecimento.

A resina sintética é amplamente aplicada na indústria de revestimentos superficiais antes de transformar-se em tintas, vernizes e esmaltes. A essa resina dá-se o nome de "substância polimérica ligante básica".

2.2.2. Termoplásticos e Termofixos

Os polímeros, vistos particularmente sob o ponto de vista das características tecnológicas, podem ser distintos em dois grandes grupos:

- Os termoplásticos (polímeros lineares ou ramificados); e
- Os termofixos (polímeros reticulados).

2.2.2.1. Termoplásticos

Um material termoplástico pode ser amolecido ou liquefeito por aquecimento e endurecido por resfriamento repetidas vezes, sem perder as suas propriedades. Tal versatilidade no processo permite que sobras de termoplásticos possam ser processadas sem grandes dificuldades.

Alguns exemplos de termoplásticos são: polietileno, polipropileno, poliestireno, poli(cloreto de vinila), ABS (copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno), náilon, etc. A estrutura molecular é linear ou ramificada.

2.2.2.2. Termofixos

Um material termofixo (termorrígido) é aquele no qual se utiliza o aquecimento para dar formato a uma peça apenas uma vez, visto que o mesmo não pode mais amolecer. Ao serem aquecidos, os termofixos formam ligações cruzadas entre as cadeias lineares, criando uma estrutura de cadeia tridimensional que impede um novo deslocamento das moléculas do polímero. Com aquecimento e pressão, somente haverá o rompimento da cadeia, resultando em séria degradação das propriedades.

Alguns exemplos são as resinas fenólicas, melamínicas e alquídicas. Outros termorrígidos, no entanto, não necessitam de aquecimento externo ou algum tipo de pressão para serem produzidos. Nos casos de poliéster, poliuretano, epóxi e silicone, são normalmente moldados com componentes líquidos que podem reagir com alguns produtos químicos à temperatura ambiente, tomando-se mais rígidos.

2.2.3 Comportamento mecânico

Sob o ponto de vista do comportamento mecânico, os polímeros são divididos em três grandes grupos, sendo eles as borrachas ou elastômeros, plásticos e fibras. Essas fases geralmente são associadas à expressão "resina", durante a sua aplicação.

2.2.3.1. Elastômeros

São polímeros que podem ser estirados repetidamente, adquirindo duas vezes o seu comprimento original à temperatura ambiente. No entanto, após a retirada do esforço mecânico causador do estiramento, o material volta rapidamente ao seu comprimento inicial em virtude de um baixo número de ligações à temperatura ambiente.

" As borrachas vulcanizadas possuem cadeias com baixa densidade de ligações cruzadas conforme pode-se ver na figura 2.14. Quanto aos elastômeros termoplásticos, apresentam características elastoméricas mesmo não sendo vulcanizados, isto é, mesmo sendo estruturalmente termoplásticos." [21]

Figura 2-14. Cadeias com baixa densidade de ligações cruzadas, ex: borrachas vulcanizadas, fonte: [21].

" As borrachas, em função das suas propriedades gerais, podem se dividir em borrachas comuns (como a borracha natural, o SBR e a borracha butílica), borrachas resistentes a óleos (como o policloropreno e a borracha nitrílica) e borrachas especiais (como os elastômeros fluorados e os elastômeros de poliuretano)." [21]

2.2.3.2 Plásticos

O termo é de origem grega e significa " adequando a moldagem ", sendo atualmente aplicado a um grande e variado número de materiais sintéticos. O componente principal desses materiais é o polímero orgânico sintético e a característica principal é o estado de fluidez que os plásticos assumem, durante um

determinado estágio do seu processamento, tornando-os passíveis de serem moldados por ação isolada ou conjunta de calor. No estágio final, assumem o estado sólido.

2.2.3.3 Fibras

Estes materiais são definidos pela condição geométrica de alta relação entre comprimento e diâmetro. Os polímeros empregados na forma de fibras são termoplásticos orientados no sentido do eixo da fibra (sentido longitudinal). As principais fibras poliméricas são: náilons, poliésteres lineares saturados - principalmente o poli (tereftalato de etileno), poli (acrilonitrila) e fibras poliolefinicas.

2.2.4 Definição de polimerizações

Polimerização é o conjunto de reações em que as moléculas simples reagem entre si formando macromoléculas de alto peso molecular. Durante o processo, devem ser consideradas algumas variáveis como a temperatura de reação, pressão, tempo, presença e tipo de iniciador e a agitação, considerados importantes fatores, que influenciam na qualidade do polímero, e que também são chamados de variáveis primárias.

Aleatoriamente, devem ser consideradas as variáveis secundárias como: o tipo de inibidor retardador catalisador controlador de massa molecular, as quantidades de reagentes e demais agentes específicos. As mudanças nas variáveis primárias durante a polimerização, afetam tanto o rendimento da reação como também produzem alterações de massa molecular média, distribuição de massa molecular, etc.

2.2.5 Transições térmicas dos polímeros

A presença de transições térmicas nos polímeros é representada por duas propriedades físicas, ou seja, por dois tipos de temperatura:

- Temperatura de transição vítrea (T_g);e
- Temperatura de fusão cristalina (T_m).

2.2.5.1 Conceitos de temperatura de transição vítrea [21]

A temperatura de transição vítrea T_g ("glass transition temperature") e suas características e seus efeitos nos polímeros, podem ser descritos da seguinte maneira:

- A transição vítrea é um fenômeno que ocorre nas regiões amorfas;
- A T_g também é conhecida como transição termodinâmica de 2ª ordem, havendo mudanças em algumas propriedades dos polímeros como módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, calor específico, etc.
- Durante o resfriamento, a T_g pode ser determinada com sendo a média da faixa de temperatura onde as cadeias poliméricas perdem a mobilidade, isto é, as macromoléculas poliméricas não têm energia interna suficiente para deslocarem-se umas em relação às outras. Nessa fase (resfriamento), onde as mudanças ocorrem abaixo de T_g , um polímero amorfo que tem 100% de suas regiões afetadas por esse nível de temperatura tende a ser "vítreo": duro, rígido e quebradiço;
- Durante o aquecimento, a T_g pode ser obtida pela média de faixa de temperatura a partir da qual as regiões amorfas readquirem progressivamente a mobilidade, isto é, em torno de 50°C os polímeros amorfos tornam-se borrachosos, moles e flexíveis.

A temperatura T_g é geralmente definida como a temperatura abaixo da qual o movimento molecular da cadeia é congelado(bloqueado). Acima dessa temperatura, há energia suficiente para permitir movimento e ondulações na cadeia. Dessa forma, as propriedades diretamente relacionadas com T_g são:

2.2.5.2 Dureza

Os materiais poliméricos, ao atingirem o nível abaixo de T_g , tendem a ser mais duros em razão da não movimentação molecular, e acima de T_g esses materiais se tornam mais moles. Nos polímeros cristalinos, essa dureza passa a ser vista como cristalinidade;

2.2.5.3 Elasticidade

A elasticidade depende sobretudo da capacidade dos segmentos das cadeias, ligados desordenadamente, de serem "endireitados" completamente sob a influência de uma tensão, associada com materiais acima de T_g ;

2.2.5.4. Resistência ao impacto

Geralmente os materiais abaixo de T_g , embora alcancem aspectos de rigidez, têm geralmente baixa resistência ao impacto. No entanto, o policarbonato (bisfenol A) é uma exceção por apresentar alta resistência ao impacto na temperatura ambiente, mesmo com um T_g de 150°C.

2.2.5.5 Conceito de temperatura de fusão cristalina [21]

A temperatura de fusão cristalina T_m ("melt transition temperature"): durante o aquecimento consiste na média da faixa de temperatura em que desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos. A energia interna do sistema alcança um nível necessário para destruir as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias, e com isso acabando também com a estrutura regular de empacotamento, atingindo assim o estado fundido (viscoso);

- A T_m consiste numa transição termodinâmica de 1ª ordem, afetando variáveis como volume específico e entalpia;
- Esta transição só ocorre na fase cristalina, ou seja, a T_m só faz sentido em polímeros semicristalinos;
- No caso do termoplástico cristalizável, ocorre cristalização entre T_g e T_m a um nível máximo e se caracteriza como temperatura de cristalização (T_K).

De forma condensada podemos considerar o modo pelo qual T_m e T_g variam de um polímero para o outro. Nesta consideração, as duas transições podem ser discutidas simultaneamente, pois, em geral, elas são afetadas similarmente quando se leva em conta a estrutura do polímero. Polímeros que têm T_m baixo (alto) geralmente têm T_g baixo (alto). Pode-se observar na tabela 2.3 a transição térmica de diversos polímeros.

Tabela 2-3 - Transição térmica dos polímeros; [22]

Polímeros	T _m (°C)	T _g (°C)
Politetrafluoretileno	327	-126
Polidimetilsiloxano	-54	-123
Polietileno Baixa Densidade	110	-120
Polietileno Alta Densidade	137	-120
Polioximetileno	175	-73
Poliisobutileno	-	-70
Policloreto de Vinilideno	198	-17
Polifluoreto de Vinilideno	171	-35
Polifluoreto de Vinila	200	-20
Polipropileno	168	-10
Poliacetato de Vinila	-	29
Polialcool Vinílico	-	85
Poli-4-metilpenteno 1	245	29
Policlorotrifluoretileno	220	45
Poliamida 66	265	-
Poliamida 11	185	-
Polietileno Tereftalato	267	67
Polibutileno tereftalato	228	-
Policloreto de vinila	-	87
Poliestireno (isotático)	240	100
Polisulfona	-	190
Policarbonato	-	150
Polioxifenileno	-	210
Estireno-acrilonitrila	-	105
Policloreto de Vinila Clorado	-	100
Polivinil-butiral	-	49
Polimetilmetacrilato	-	105
Poli-p-xileno	405	-
Polisulfeto de fenileno	290	-
poliacrilonitrila	317	104
Etileno-propileno-fluorado	290	-

2.2.6 Propriedades dos polímeros

O conjunto das propriedades de maior interesse para a avaliação do desempenho dos polímeros pode ser dividido nos seguintes grupos: propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas, resistência química, solubilidade e gerais [24]. No entanto, serão abordadas nesse capítulo apenas as propriedades de maior relevância para o comportamento dos polímeros face a sua aplicação como material básico na confecção de cruzetas.

2.2.6.1 Propriedades mecânicas

O comportamento mecânico de um polímero pode ser caracterizado por suas propriedades de "tensão-deformação", ou seja, a partir do momento em que se aplica uma tensão em um polímero para deformá-lo até provocar uma ruptura.

O comportamento mecânico dos plásticos é fortemente afetado pelo tempo de atuação das solicitações, assim como pela temperatura.

Os parâmetros ou grandezas que caracterizam o comportamento mecânico dos polímeros devem vir sempre associados às condições de temperatura do ensaio e ao tempo de atuação da solicitação. Isso considerando que a temperatura e o tempo são fatores externos que afetam diretamente o comportamento mecânico destes materiais, como veremos a seguir.

As propriedades mecânicas podem ser citadas como:

- tração (módulo de elasticidade, resistência à tração, alongamento na ruptura);
- flexão e compressão;
- cisalhamento e resistência ao impacto;
- resiliência e histerese;
- desenvolvimento de calor em carregamento cíclico;
- resistência à fadiga e outras propriedades mecânicas de longo prazo (fluência e relação de tensão);
- dureza;
- resistência à fricção; e
- resistência à abrasão;

teste 1990

2.2.6.2 Comportamento em tração

O comportamento à tração dos polímeros é geralmente determinado em corpos-de-prova com forma de halter, na seção mais estreita do mesmo. Os corpos - de prova são colocados entre as garras de um equipamento de tração, onde é aplicada uma velocidade de "afastamento" constante, e a ruptura depende de como essa força é aplicada.

2.2.6.3 Comportamento em compressão

O comportamento em questão é determinado em um corpo-de-prova de seção cilíndrica, colocado entre os pratos de um equipamento que aplica uma força de compressão. Os ensaios de compressão são importantes como fonte de informação das características de "escoamento" do material polimérico, especialmente quando ele apresenta fragilidade no teste de tração. É o que acontece com o poliestireno e com os polímeros termoendurecíveis, que são frágeis durante a tração e exibem deformação plástica durante a compressão.

2.2.6.4 Comportamento em flexão

Determina-se esse comportamento através de um corpo-de-prova em forma de barra retangular, apoiado em suas extremidades, sendo a força aplicada no meio do vão. Os elementos mais importantes que se determinam são o módulo de elasticidade "E" e a resistência à flexão "a". Como a flexão envolve esforços de tração e de compressão, o seu módulo de elasticidade atinge os mesmos valores dos módulos obtidos nos dois ensaios anteriores.

2.2.6.5 Comportamento em fluência

O fenômeno da fluência se dá quando o polímero é sujeito a uma força ou tensão constante, exibindo no fim uma deformação que aumenta com o tempo. Os corpos-de-prova neste ensaio são submetidos a um esforço constante de compressão ou tração, sendo registrada a variação das deformações do material em função do tempo, a uma temperatura constante.

A influência da estrutura molecular pode ser observada no valor dado pelas deformações, em meio ao ensaio desse comportamento. De um modo geral pode-se afirmar que quanto mais fracas e em menor número forem as ligações intermoleculares, quanto menor for o grau de reticulação e quanto mais fáceis forem as rotações em torno das ligações químicas, maior é a aptidão para a fluência;

2.2.6.6 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas dos polímeros são tão importantes quanto as suas propriedades mecânicas. Ao contrário dos metais, por exemplo, os polímeros são extremamente sensíveis às mudanças de temperatura, e para serem observadas as propriedades mecânicas, elétricas e químicas, ou gerais, dos polímeros, é indispensável o conhecimento da temperatura na qual tais valores foram obtidos.

As propriedades e as características dos polímeros somente são observadas quando a variável fundamental dos experimentos é a temperatura, isolada ou em conjunto com outras variáveis, de forma que a temperatura, ou a energia térmica (calor) a ela associada, acompanha o material e lhe causa alguma alteração ou transformação que será detectada.

Para temperaturas muito baixas, os polímeros são frágeis. À medida que a temperatura aumenta, o material adquire uma certa elasticidade resultante do movimento das ramificações de cadeia e das próprias cadeias moleculares. Continuando a aumentar a temperatura, as ligações intermoleculares quebram-se e as cadeias moleculares movem-se livremente até que se atinge o estado "fundido". Para temperaturas suficientemente elevadas, as ligações covalentes das cadeias moleculares quebram-se e dá-se a decomposição do polímero.

O ponto de fusão é melhor definido quando maior é o grau de cristalinidade. Os termofixos não fundem em consequência da sua estrutura reticulada, no entanto, existem alguns termofixos sensivelmente reticulados que, quando aquecidos, apresentam um aspecto viscoso resultante da fusão das zonas não - reticuladas.

As características e propriedades mais importantes para os polímeros ficam por conta da determinação das transições térmicas do comportamento térmico desses materiais, obtidas através de [20]:

- análises térmicas e propriedades termofísicas, onde são verificados o calor específico, condutibilidade térmica e coeficiente de expansão térmica;
- ensaios termodinâmicos de temperatura de deflexão ao calor sob carga (HDT), ponto de amolecimento VICAT e temperatura de fragilização; e
- ensaios para determinação das temperaturas máximas de utilização.

2.2.6.7. Absorção de água

Na maior parte, os polímeros são insolúveis em água; no entanto, eles podem absorvê-la e assim afetar de forma variável algumas das suas propriedades como a resistência elétrica e as propriedades mecânicas [20].

O pior efeito da absorção aquosa nos polímeros verifica-se na resistência elétrica. No entanto, em alguns deles, como as poliamidas e os poliésteres, verifica-se alteração de propriedades mecânicas.

De um modo geral:

- polímeros como o polietileno, polipropileno, poliestireno, poli (cloro de vinila), poli (tetrafluoretileno), poliuretano e silicone, manifestam pequena tendência para absorção de água;
- quanto menos grupos CH existirem na molécula do monômero de uma poliamida, maior é a quantidade de água absorvida por estes polímeros;
- os polímeros com grupos moderadamente polares, como os ésteres, são moderadamente absorventes. É o caso do poli(oximetileno), dos poliésteres, dos policarbonatos e do poli (metacrilato) de metilo;

2.2.6.8 Combustibilidade

A combustibilidade dos polímeros é muito variável, dependendo tanto da natureza química como dos aditivos que fazem parte de sua composição.

A combustão dos polímeros, de modo análogo ao que ocorre com qualquer outro tipo de material combustível, é a combinação de uma complexa série de processos físico-químicos que resultam na conversão dos reagentes iniciais em produtos de combustão.

O curso da queima dos polímeros é definido por quatro estágios iniciais, sendo eles o aquecimento, a pirólise, a ignição e a propagação da chama. Apesar de

todos esses fatores serem importantes para o desempenho dos polímeros, é na última etapa - propagação da chama - que se baseia a maior parte dos métodos utilizados para a avaliação da combustibilidade destes materiais.

Os polímeros como o polietileno, o polipropileno e o poliestireno [20], queimam com facilidade. Já os polímeros halogenados como o poli (cloreto de vinila) e o poli (tetrafluoretileno), que possuem nas suas macromoléculas, respectivamente, átomos de cloro e de flúor, queimam com dificuldade. No entanto, o poli (cloreto de vinila) decompõe-se a temperaturas relativamente baixas (200°C), libertando grandes quantidades de ácido clorídrico, que é um gás tóxico.

O comportamento ao fogo dos polímeros pode ser melhorado pela adição de retardantes de chama. No entanto, a natureza química do polímero prevalece e o seu comportamento ao fogo não pode ser drasticamente modificado.

2.2.6.9 Propagação da chama

A taxa de propagação da chama é função das propriedades físico-químicas do polímero, dos parâmetros cinéticos das reações de combustão e das condições gerais em que a queima é procedida [23].

Considerando os comportamentos inerentes às propriedades físico-químicas dos polímeros, podem ser diagnosticadas diversas maneiras de se reduzir a combustibilidade dos polímeros, agrupadas nas seguintes categorias:

- síntese de polímeros não combustíveis;
- uso de agentes retardantes de chama reativos (modificação química dos polímeros);
- uso de agentes retardantes de chama como aditivos;
- aplicação de revestimento antichama; e
- combinação de vários métodos;

2.2.6.10 Propriedades Elétricas

Assim como os polímeros são maus condutores de calor, são também maus condutores de eletricidade [24].

A temperatura influencia a maioria das propriedades elétricas desses isolantes. As principais características dos materiais poliméricos são: rigidez

dielétrica, resistividade, constante dielétrica, fator de potência, fator de dissipação e resistência ao arco.

- Rigidez dielétrica – esta propriedade indica em que grau um material é isolante; é medida pela tensão elétrica que o material pode suportar antes da ocorrência de perfuração do material isolante. Apresenta-se na figura 1 do Anexo B um gráfico comparativo da rigidez dielétrica de diversos materiais.
- Resistividade Volumétrica – a resistência de materiais isolantes à passagem da corrente elétrica é medida como resistividade volumétrica entre as faces de uma unidade cúbica, para um dado material e uma dada temperatura. Os polímeros são péssimos condutores, oferecendo alta resistência a passagem de corrente elétrica. Apresenta-se na figura 2 do Anexo B a resistividade volumétrica de alguns materiais.
- Constante dielétrica – esta propriedade é uma característica correlacionada à energia eletrostática que pode ser armazenada em um capacitor que tem o material como dielétrico. É medida pela razão entre a capacitância do capacitor contendo como isolante o material em questão e a capacitância do mesmo sistema, porém, o material isolante é o ar. Apresenta-se na figura 3 do Anexo B um gráfico comparativo da constante dielétrica de diversos materiais.
- Fator de potência - esta propriedade é a razão entre a potência dissipada pelo material isolante e a máxima potência que seria fornecida ao sistema, mantendo-se os mesmos valores de diferença de potencial e intensidade de corrente. Esta é uma medida relativa da perda dielétrica do material, quando o sistema age como isolante, e é usada como medida de qualidade do isolante.
- Resistência ao Arco – esta propriedade é uma medida das condições de perda das características dielétricas ao longo da superfície de um isolante, causada pela formação de caminhos condutivos na superfície do material. Esta relacionada a rigidez dielétrica e a altas temperaturas.

2.2.6.11 Resistência aos produtos químicos

A resistência dos polímeros aos produtos químicos depende da natureza dos próprios polímeros e dos produtos químicos em causa. Cada família de polímeros tem uma resistência própria a determinado produto ou classe de produtos [20].

Como regra geral, temos:

- os termofixos são, em princípio, menos sensíveis aos solventes que os termoplásticos;
- um termoplástico é mais resistente quanto maior for o seu grau de cristalinidade;
- os polímeros de maior inércia química são os fluoretados, por exemplo o PTFE (poli (tetrafluoretino)).

2.2.6.12 Resistência às ações climáticas

A resistência dos polímeros às ações climáticas depende tanto da natureza dos próprios polímeros (constituintes químicos, morfologia, massa molecular e outros) como dos fatores climáticos, como a radiação solar, temperatura, oxigênio, água, etc.

A radiação solar tem uma ação relevante na degradação dos polímeros. O espectro solar contém comprimentos de onda correspondentes às radiações ultravioleta, visível e infravermelha. Grande número de polímeros contém ligações químicas cuja energia de "dissociação" é inferior a 300 nm, tornando-se assim vulneráveis à ação da radiação ultravioleta emitida pela luz solar [20].

A degradação resultante da associação dos diversos fatores climáticos provoca alterações diversas como quebra de ligações químicas presentes nas cadeias moleculares, reticulações destas, aparecimento de compostos oxidados resultantes da ação do oxigênio sobre as cadeias moleculares, alterações essas que se manifestam por fenômenos como opacidade, escurecimento e diminuição de propriedades mecânicas.

2.2.7 Os Aditivos e suas Funções

A fabricação dos produtos plásticos é constituída basicamente de polímeros designados resinas. No entanto, estas resinas não são utilizadas isoladamente, pois,

antes de serem introduzidas nas máquinas que as transformam (injetoras, extrusoras, etc...), recebem a adição de substâncias chamadas de aditivos.

Os aditivos, apesar de concentrarem uma porcentagem pequena da composição, têm grande importância devido às suas funções variadas como a modificação da cor e da apresentação do produto final, melhoria das propriedades deste produto ou ainda a melhora na facilidade da desmoldagem. "A mistura da resina com os aditivos recebe o nome de composto, o qual em seguida é transformado em produto final, mediante a utilização de diferentes técnicas de processamento" [20].

2.2.7.1 Plastificantes

" Os plastificantes são aditivos que se juntam à resina com o fim de alterar as propriedades mecânicas do produto final. Eles atuam aumentando a deformabilidade e diminuindo a fragilidade. Por outro lado, os plastificantes facilitam as condições de processamento dos plásticos, permitindo baixar a sua temperatura de transformação" [20].

As moléculas de plastificantes introduzem-se entre as cadeias moleculares do polímero enfraquecendo, deste modo, as forças intermoleculares e originando uma estrutura molecular menos rígida, conforme pode-se observar na figura 2.15.

Figura 2-15. A ação do plastificante.

A adição de plastificantes é necessária para que os polímeros possam ter flexibilidade, resiliência e ponto de fluência. Se não for efetuada essa adição, a fabricação de folhas plásticas, tubos, filmes ou outra forma de material plástico

torna-se muito difícil e, em alguns casos, quase impossível. Os plastificantes agem como "lubrificantes" das cadeias moleculares, permitindo um maior movimento entre elas. Um plastificante deve reunir um conjunto de propriedades que o tornem adequado para ser incorporado no composto, e mesmo sabendo-se que é difícil encontrar essas propriedades num só plastificante é comum utilizar-se mistura de dois ou mais destes aditivos [25].

Algumas das propriedades exigidas de um plastificante são o ponto de ebulição elevado, boa resistência à luz e ao calor, compatibilidade com o polímero e características viscosimétricas adequadas. É importante também que o plastificante não tenha tendência a libertar-se da estrutura molecular do polímero, evitando-se assim a sua migração para a superfície do produto final. A migração origina uma alteração das características mecânicas, ficando o produto final mais quebradiço, menos flexível e com o seu aspecto alterado.

2.2.7.2 Estabilizantes

Os estabilizantes são aditivos que protegem o polímero da degradação. Isto pode ocorrer durante a transformação do material em produto acabado, em consequência do calor e dos esforços mecânicos, ou então, posteriormente, durante a utilização em meio à radiação solar, à temperatura, etc.

Devido à natureza orgânica dos polímeros, os mesmos são mais suscetíveis ao ataque químico por elementos do ambiente, que causam uma degradação lenta ou um envelhecimento dos polímeros [25]. Como o maior tipo de ataque que os polímeros sofrem é por oxidação, muitas vezes acelerado pela radiação ultravioleta da luz solar, a maioria dos estabilizadores são do tipo antioxidantes, embora alguns sejam fotoestabilizadores e termoestabilizadores.

Um dos casos que podem ser citados é a degradação do PVC, manifestada a partir dos 140°C. Uma das causas que levam este polímero a se degradar acontece durante a fase de transformação, onde é necessário utilizar temperatura entre 150°C e 200°C. Outra causa é utilização do PVC no ambiente exterior, o que o torna sujeito tanto à ação do calor quanto da luz solar, ambos agentes de degradação. Assim, torna-se necessário incorporar estabilizantes na resina de modo a contrariar os fenômenos de degradação, os quais são traduzidos pela libertação de ácido clorídrico,

pela formação de duplas ligações conjugadas, pela coloração e fragilização do PVC. Quando presente, o oxigênio acelera os fenômenos de degradação.

2.2.7.3 Estabilizantes de ultravioleta

" As categorias de estabilizantes destinam-se a evitar o efeito da radiação ultravioleta, existente em maior ou menor percentagem na radiação solar, sobre o polímero. Para isso, podem usar-se películas protetoras que se interpõem entre o polímero e a radiação, e atuam por absorção da radiação ultravioleta. Além destas, podem ser usadas substâncias absorventes mas incorporadas na massa do polímero, o que é, aliás, a situação mais comum" [20]. Existem estabilizantes importantes que se destinam a evitar ou retardar a ação do oxigênio sobre o polímero.

2.2.7.4 Lubrificantes

"A transformação dos polímeros termoplásticos faz-se a quente. A matéria-prima (resina) torna-se viscosa e tem tendência a aderir às paredes do equipamento de transformação. Para evitar este fenómeno, adicionam-se lubrificantes à formulação do polímero, sendo os mais comuns o óleo de soja epoxidado, o ácido esteárico, os estearatos de chumbo e de cádmio" [20].

2.2.7.5. Cargas

As cargas são substâncias normalmente sólidas, nas quais uma das funções é diminuir o custo do produto final, reduzindo a quantidade de polímero empregada. Estes aditivos também são chamados de substituintes de volume, pois há a introdução de uma carga de baixo custo no composto a ser transformado, dentro de certos limites que não alterem as propriedades do produto final e, assim, se torne uma vantagem econômica.

As cargas são classificadas em granulares e fibrosas, sendo alguns exemplos de cargas granulares o carbonato de cálcio, o pó de amianto, a mica, a farinha de madeira, a casca de frutos, o negro de fumo e a borracha. Quanto às cargas fibrosas, podem ser citadas como exemplo as fibras de amianto, de vidro, celulósicas e sintéticas.

No caso do negro de fumo, a função é múltipla, pois, além de ser um anti-oxidante, é um estabilizante do plástico contra a radiação ultravioleta e utilizado também como carga.

As propriedades finais do polímeros são afetadas pela incorporação das cargas e é importante que se limite a quantidade a ser adicionada à resina a valores abaixo das aplicações críticas [25]. Normalmente, as cargas aumentam a resistência dos polímeros nas várias condições de serviço.

Uma das funções das cargas é melhorar o comportamento do produto final para uma aplicação particular. É exemplo disso a aplicação de amianto, que adicionado ao PVC lhe confere melhor estabilidade dimensional. Há também a dispersão do pó de borracha no seio do poliestireno, que melhora a sua resistência ao choque, obtendo-se assim o poliestireno - antichoque. Ao adicionar-se pó de borracha ao poliestireno para melhorar o seu comportamento ao choque, são introduzidas alterações nas suas características mecânicas, como o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura em tração, que diminuem.

As cargas fibrosas, como é o caso do vidro e do amianto, têm um papel importante no reforço dos polímeros. As propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à tração e ao choque, melhoram com a introdução do reforço de fibras. No caso do vidro, por ter uma boa resistência química, torna-se um material muito interessante como reforço de polímeros para diversas aplicações como: tubos, louça sanitária, reservatórios, chapas onduladas, etc.

2.2.7.6 Retardantes de chama

Quanto à técnica utilizada para a redução de combustibilidade dos polímeros, pode-se dizer que não há uma aplicação universal a todos os polímeros, sendo que cada um exige uma solução específica em determinadas situações, condicionadas por requisitos particulares quanto à prevenção de incêndio.

A maneira mais promissora a ser utilizada no aspecto anti-combustibilidade é a "síntese de polímeros não-combustíveis", cuja técnica é ainda muito limitada por questões de natureza econômica e dificuldades de síntese e de reprocessamento. Atualmente, é muito utilizada a modificação química de polímeros caracterizada pela introdução de determinados grupamentos químicos diretamente nas macromoléculas

durante a síntese das mesmas. Estes grupamentos são definidos por "retardantes de chama reativos" [23].

"O uso dos chamados aditivos retardantes de chama consiste na incorporação física de determinadas substâncias durante a etapa de processamento do polímero. Esta técnica tem a vantagem de não ser diretamente ligada ao processo de manufatura dos polímeros, fator que aumenta consideravelmente o leque de possibilidades na busca de novos materiais. Em relação à técnica da modificação química, o uso de retardantes do tipo aditivo também apresenta vantagens com relação aos custos de matéria-prima e de incorporação" [23].

O retardante de chama deve inibir o processo de combustão. Dependendo da natureza, um retardante de chama pode atuar fisicamente, quimicamente, ou de ambas as formas nas fases sólida, líquida ou gasosa, interferindo com uma etapa particular do processo de queima. No caso dos retardantes de chama, os que inibem o processo de combustão por interferência química são mais eficientes. Contudo esta maior eficiência em combater a combustibilidade nem sempre é vantajosa diante de outros fatores, tais como custo, toxidez, durabilidade, etc.

Com base nas declarações dos parágrafos anteriores, pode se chegar à conclusão que a aplicação de aditivos retardantes de chama durante a polimerização, deve ser acompanhada do alto conhecimento da natureza química e física de cada material polimérico, sem exceções.

Os aditivos retardantes de chama de maior utilização na atualidade são:

- hidróxido de alumínio;
- boratos;
- fosfatos;
- organo-halogenados;
- trióxido de antimônio; e
- hidróxido de magnésio.

2.2.8 – Polímeros em Sistemas Elétricos

O uso de isoladores construídos à base de compostos poliméricos, em sistemas elétricos externos ocorre há aproximadamente 53 anos [21]. Eles compreendem uma gama de materiais e formulações.

Entre os materiais utilizados, está a resina bisfenol-epóxi, a qual era comercialmente usada para aplicações em recinto fechado na década 1940.

Na década seguinte, a resina epoxy cicloalifática foi usada na Inglaterra para aplicações internas devido ao seu melhor comportamento [21].

Os isoladores poliméricos para linhas de transmissão começam a ser produzidos nos EUA e na Europa em meados de 1975 e diferentes materiais foram utilizados para a confecção de isoladores poliméricos [26].

Inicialmente, estes materiais incluíam borracha etileno-propileno (EPR) a qual foi feita pela CERAVER da França em 1975, Ohio Brass dos Estados Unidos em 1976, Sedivar dos Estados Unidos em 1977 e Lapp dos Estados Unidos em 1980.

A borracha de Silicone (SIR) foi manufaturada por Rosenthal na Alemanha em 1976 e ganhou confiança nos Estados Unidos em 1983.

Em 1986, a Ohio Brass introduz uma liga de monômero etileno-propileno (EPM) e borracha de silicone, a qual foi em 1989 modificada para monômero etileno propileno dieno (EPDM) e a combinação da borracha de silicone [21].

Pesquisas recentes com resinas poliuretanas à base de óleo de mamona[27] mostram um novo material para ser utilizado na confecção de elementos isolantes para uso nos sistemas elétricos.

Atualmente, são fabricados isoladores poliméricos em todo o mundo e o seu consumo vem aumentando gradativamente.

No ano de 2001, iniciou-se um trabalho de pesquisa e desenvolvimento de cruzeta à base de termofixo. O material selecionado para tal desenvolvimento foi a fibra de vidro. Em julho de 2001, foi manufaturada a primeira cruzeta à base de fibra de vidro. Nos ensaios elétricos, esta resina apresentou uma condutividade superficial, provocando trilhamento na peça. As empresas envolvidas nesta pesquisa estão modificando a composição da resina e do processo produtivo para que a mesma apresente resultados satisfatórios nos ensaios elétricos.

A figura 2.16 apresenta o equipamento de pultrusão utilizado na fabricação da cruzeta em fibra de vidro.

Figura 16 - Produção de cruzeta em Fibra de Vidro

Neste trabalho de pesquisa, foi selecionada a cruzeta como elemento estrutural a ser estudado por sua larga aplicação nos sistemas aéreos de distribuição no Brasil e pelos problemas que causa em caso de falha.

O polímero selecionado para servir como base para a manufatura da cruzeta foi o polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro, produzido pela empresa Borealis OPP e denominado SG616, conforme será apresentado posteriormente.

CAPÍTULO 3

Seleção dos Polímeros para Confeção de Cruzetas

Um conjunto muito grande de materiais para a construção de cruzetas estão presentes no mercado, tais como:

- Madeira
- Ferro
- Concreto
- Plásticos (polímeros)

Devido a fatores, tais como, durabilidade, reciclabilidade e a existência de um amplo parque de produção de polímeros implantado no Brasil, voltou-se esta pesquisa para o desenvolvimento de uma cruzeta polimérica como alternativa para os sistemas aéreos de distribuição de energia.

Os Plásticos (polímeros) abrangem também uma gama muito grande de tipos, apresentando flexibilidade de composição, correção de deficiências químicas através de aditivação, facilidade de aquisição e boas propriedades dielétricas.

Contudo, as cruzetas poliméricas necessitam atender alguns aspectos técnicos e econômicos, conforme segue:

- Ter alta resistência mecânica (Tração e Impacto)
- Ter boas propriedades dielétricas (alto valor de rigidez dielétrica)
- Ter baixo custo construtivo
- Ser reciclável

Foram selecionados para esta pesquisa os principais polímeros disponíveis no mercado, ou seja:

- Resina Poliuretana – Termofixo
- Poliéster Insaturado
- PC – Policarbonato
- PTFE - Poli (Tetrafluoretileno)
- PA 6.6 – Poliamida (Nylon)
- PMMA - Polimetilmetacrilato
- FIBERGLASS (Poliéster + Fibra de Vidro)
- PEAD – Polietileno de Alta Densidade
- PP Homopolímero – Polipropileno Homopolímero
- PP + 40% Fibra de Vidro – Polipropileno reforçado –SG616

A seleção do polímero adequado para a confecção da cruzeta foi dividida em três etapas:

- Caracterização dos polímeros a serem trabalhados com base nas premissas técnicas e econômicas definidas para a construção da cruzeta. A ser vista neste capítulo;
- Simulação mecânica com base em módulo de tração. Como apresentada no capítulo 4, e
- Ensaio Elétricos (rigidez e trilhamento). Como apresentados no capítulo 4.

Quando se trata de polímeros, um aspecto importante é a análise de sua estabilidade química e sua reação à ação dos raios ultravioleta. Estes dois agentes determinam a durabilidade do material em ambientes externos.

A cruzeta a ser construída deverá ter uma durabilidade no mínimo igual a dez anos, devido a necessidade de redução das intervenções de manutenção corretiva. Aumenta-se a vida útil da cruzeta à medida em que se estabiliza o polímero e o protege contra a ação dos raios ultravioleta.

Conforme pode-se ver no capítulo 2, a resistência dos polímeros às agressões por produtos químicos depende da natureza dos próprios polímeros e dos produtos químicos a que estarão expostos.

Quanto à ação dos raios ultravioleta, depende da constituição dos polímeros e das próprias condições climáticas a que estarão submetidos.

Tendo como objetivo o atendimento à durabilidade temporal, o baixo custo para a composição da cruzeta, alta resistência a impactos, estabilidade química, resistência aos raios UV (ultravioleta), boas propriedades dielétricas e reciclabilidade, foi montada a tabela 3.1.

As notas da tabela 3.1 foram estabelecidos através de cálculo com a seguinte equação:

$$Nota = \left[\left(\frac{4}{(m_{ap} - m_{ep})} \right) * (v_p - m_{ep}) \right] + 1 \quad (3.1)$$

Onde:

m_{ap} → Maior valor da propriedade entre os polímeros

m_{ep} → Menor valor da Propriedade entre os polímeros

v_p → Valor da propriedade do polímero

A nota dada a reciclabilidade, foi estabelecido em consulta a profissionais atuantes na área de polímeros. No anexo C podem-se ver os critérios utilizados para a montagem da equação 3.1, bem como todos os valores dos quesitos utilizados na tabela 3.1.

A tabela 3.1 apresenta as notas das características dos polímeros, que serão utilizadas para o cálculo de sua nota final na tabela 3.3.

Tabela 3.1 - Notas das Características dos Polímeros

TIPO DE POLÍMERO	DENSIDADE	NOTA CUSTO	NOTA PROPRIEDADES DIELÉTRICAS	NOTA Módulo de Elasticidade	NOTA RECICLABILIDADE	NOTA RESISTÊNCIA AO IMPACTO	PROCESSO PRODUTIVO
PP + 40%FV	1,24	1,334	3,760	5,000	5	1,056	INJEÇÃO / EXTRUSÃO
PEAD	0,95	1,000	3,208	1,574	5	1,652	EXTRUSÃO / INJEÇÃO / SOPRO
PP HOMOPOLÍMERO	0,90	1,021	3,760	1,709	5	1,056	INJEÇÃO/EXTRUSÃO/SOPRO
PMMA	1,18	1,514	3,401	2,858	3	1,000	INJEÇÃO / EXTRUSÃO
PTFE - Poli (Tetrafluoretileno)	2,10	1,723	3,760	1,161	-	2,025	SINTERIZAÇÃO DE PÓ
PC (Policarbonato)	1,12	2,619	1,692	2,537	5	5,000	INJEÇÃO / SOPRO
PA 6.6	1,13	2,774	5,000	2,537	3	1,354	INJEÇÃO
Resina Poliuretana (termofixo)	1,05	2,290	1,000	1,000	-	5,000	RIM
Poliéster insaturado	1,10	3,025	1,828	3,083	-	1,000	PULTRUSÃO
FIBERGLASS (POLIÉSTER+FV)	1,80	5,000	1,609	3,083	-	1,000	HAND LAY-UP

Estabelecido a nota de cada uma das características necessárias para a confecção da cruzeta polimérica e os meios utilizados para a sua produção, analisa-se agora a forma de combinação das diversas características e sua importância no processo produtivo e de aplicação em campo para se obter os melhores polímeros para a nossa pesquisa.

Sendo assim, foi estabelecida uma equação compreendendo a soma das notas de cada uma das características. O custo é fator primordial dentro do processo produtivo e a nota dada a esta característica é inversa, ou seja, quanto menor a nota, maior a possibilidade deste polímero ser o selecionado para a construção da cruzeta. Portanto, estabelece-se o custo como elemento de divisão da equação.

A tabela 3.2 define a abreviatura de cada uma das características que compõem a equação:

Tabela 3.2 – Abreviaturas das características dos polímeros

ABREVIATURAS DAS CARACTERÍSTICAS	
Característica	Abreviatura
Custo	C
Módulo de Elasticidade	Me
Resistência ao Impacto	Ri
Rigidez Dielétrica	Rd

Estabelece-se a nota de classificação dos polímeros através da equação 3.2.

$$Nota = \frac{(me + ri + rd)}{c} \quad (3.2)$$

Definida a equação para posicionar cada um dos polímeros através de suas características, a tabela 3.3 mostra o resultado do cálculo da nota para cada um dos polímeros apresentados. Encontram-se no Anexo C os critérios para a elaboração da equação 3.2.

Tabela 3.3 – Tabela com o resultado do cálculo das Notas das características dos Polímeros.

TIPO DE POLÍMERO	DENSIDADE	PROCESSO PRODUTIVO	Nota
PP + 40%FV	1,24	Extrusão / Injeção	7,36
PEAD	0,95	Extrusão / Injeção / Sopro	6,63
PP HOMOPOLÍMERO	0,90	Extrusão / Injeção / Sopro	6,39
PMMA	1,18	Extrusão / Injeção	4,80
PTFE – Poli (Tetrafluoretileno)	2,10	Sinterização de Pó	4,03
PC (Policarbonato)	1,12	Injeção / Sopro	3,52
PA 6.6	1,13	Injeção	3,21
Resina Poliuretana (termofixo)	1,05	RIM	3,06
Poliéster Insaturado	1,10	Pultrusão	1,95
FIBERGLASS (POLIÉSTER+FV)	1,80	HAND LAY-UP	1,14

Através dos cálculos das notas, pode-se determinar a ordem de prioridade na seleção dos polímeros para a produção da cruzeta.

Portanto, conforme definido anteriormente, nesta etapa escolhe-se os dois melhores polímeros para a execução do nosso trabalho de simulações mecânicas e ensaios elétricos. A metodologia utilizada reduz o tempo de avaliação dos materiais e o custo para a realização dos ensaios e simulações.

O PP + 40% FV(Polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro) e o PEAD (Polietileno de alta densidade), de acordo com as notas calculadas, são os dois melhores polímeros.

As simulações mecânicas e os ensaios elétricos complementam as informações necessárias para a definição do polímero para a construção da cruzeta.

CAPÍTULO 4

Simulação Mecânica, Ensaios Elétricos e Viabilidade Econômica

Após a seleção do Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e do Polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro (PP + 40%FV), passa-se à fase dos ensaios mecânicos e elétricos para avaliar se a cruzeta à base destes polímeros atende às solicitações mecânicas e elétricas nas aplicações em ambiente externo. O polímero de melhor desempenho será o escolhido para a confecção da cruzeta.

Normalmente a execução de ensaios mecânicos ocorre mediante a confecção das cruzetas, contudo, como para a construção das cruzetas, precisa-se de projetos e moldes, com custo aproximado de \$ 11.500,00 (onze mil e quinhentos dólares) e outros custos oriundos da compra de matéria prima, mão-de-obra de terceiros e extrusor, esta fase foi feita através de simulação computacional.

Projetando e simulando a cruzeta computacionalmente, evita-se o dispêndio inicial destes recursos, principalmente devido ao risco de o molde ter que sofrer alterações em suas dimensões para reforçar mecanicamente a cruzeta, gerando aumento dos custos iniciais.

Após terem sido concluídas as simulações mecânicas, efetuou-se ensaios de rigidez [28] e trilhamento [29] em placas especialmente preparadas.

Esses ensaios elétricos objetivaram determinar se as características elétricas eram compatíveis para a aplicação em estudo.

O polímero a ser escolhido para compor a base para construção da nova cruzeta deverá atender todas as características abaixo relacionadas:

- Resistência mecânica que atenda as solicitações de norma [10] ;
- Resistência ao impacto. Do processo de fabricação até o ponto de instalação da cruzeta, esta sofre diversos impactos que podem danificá-la ou comprometer o seu desempenho na rede;
- Estabilidade química. Para evitar a deterioração do material devido a uma instabilidade do material selecionado;
- Resistência a radiação ultra-violeta (envelhecimento). Através da adição de Negro de fumo ou de outro aditivo anti-UV pode-se aumentar a vida útil da cruzeta, evitando a deterioração precoce do material.
- Reciclabilidade. Ser reciclável é uma premissa básica para este projeto devido à redução de custos no processo de fabricação ou o ganho com a venda deste material ao final de sua vida útil;
- Propriedades elétricas. O polímero selecionado deverá apresentar excelentes propriedades elétricas. Desta forma, a nova cruzeta traz um aumento de NBI para a estrutura da nova rede;
- Processo produtivo e tempo de cura. Os custos de produção estão diretamente relacionados com o processo produtivo e o tempo que este composto levará para estar pronto para a sua aplicação (venda). Portanto, o polímero a ser selecionado deverá apresentar um processo produtivo barato e um tempo de cura baixo;
- Bom acabamento superficial. Importante ressaltar que o bom acabamento superficial evita a deposição de substâncias que possam comprometer as características elétricas do material.

4.1 Simulação Mecânica

A simulação mecânica reduz significativamente o tempo de análise do material, os custos dos ensaios e de possíveis correções no molde e também visa determinar a configuração geométrica de uma cruzeta que atenda às especificações

para utilização em postes de linhas de distribuição de energia elétrica. Essas especificações básicas consistem nas dimensões externas e na furação da cruzeta.

Considerando que o módulo de elasticidade é fator determinante na característica mecânica do material, a simulação mecânica foi realizada com o maior valor de módulo entre os dois polímeros.

4.1.1 Requisitos de Projeto

A cruzeta deve manter o desenho externo inalterado em relação ao produto atualmente em uso, inclusive respeitando as dimensões para a furação. Desta forma o produto final terá ampla aplicação e aceitação no mercado atual de venda de cruzetas.

A figura 4.1 mostra a configuração geométrica e as dimensões da cruzeta a ser simulada [2] [30].

Figura 4.1 – Geometria e dimensões em mm da cruzeta simulada computacionalmente

A partir do desenho acima decidiu-se testar diversas configurações, tentando diminuir ao máximo o peso da peça. Avaliaram-se configurações ocas com paredes de 10mm e 15mm e uma configuração oca com uma travessa interna em forma de "X" com 10 mm de parede.

Figura 4.2 – Cruzeta com 10mm de parede(esquerda), Cruzeta com 15mm de parede(centro) e cruzeta com 10mm de parede com reforço central em X (direita)

A tabela 4.1 mostra o volume e a massa calculados para a respectiva peça

Tabela 4.1 – Volume e massa das cruzetas simuladas

Modelo	Volume (L)	Massa (Kg)
10 mm	7,76	9,62
15 mm	11,63	14,42
X 10 mm	13,04	16,17

A carga de 400 Kgf em cada um das extremidades, totalizando 800 Kgf deve ser suportada com um apoio central para restringir a peça, ficando a configuração semelhante a uma viga apoiada no centro com duas cargas nas extremidades, conforme norma [10].

Nas figuras 4.3 e 4.4, tem-se uma representação desses esforços; as setas amarelas representam um esforço de 400 kgf aplicado e os marcadores azuis, a região do apoio.

Figura 4.3 – Visão frontal dos esforços aplicados à cruzeta, para análise por elementos finitos.

Figura 4.4 – Visão tridimensional dos esforços aplicados à cruzeta, para análise por elementos finitos.

4.1.2 Metodologia utilizada na simulação mecânica

Para a análise de elementos finitos utilizou-se o software *MSC.Marc*.

O desenho dos modelos e a geração de malha foi feita no software *EDS I-DEAS Master Modeller*.

As malhas geradas com o I-DEAS foram submetidas à etapa seguinte, o pré-processamento da análise, incluindo acerto de condições de contorno, propriedades e especificação de opções de análises, no programa *MSC.PATRAN*.

Com todas as condições acertadas, os diversos modelos foram analisados com o *MSC.Marc*.

Após as análises, efetuou-se a etapa de pós-processamento incluindo a visualização e análise dos resultados também feita utilizando-se o programa *MSC.PATRAN*.

Durante a análise, alguns fatores tiveram que ser avaliados para se chegar a um resultado conclusivo.

Os fatores que foram considerados:

- **Tamanho do modelo x detalhes:** As maiores dimensões do modelo são muito maiores que os menores detalhes que precisam ser representados, no caso os furos. Diante deste fato, a malha tem que ser bem refinada para

incluir os detalhes, e como o modelo é grande, obtém-se uma malha com grande número de elementos aumentando o tempo de cálculo;

- **Concentração de tensões:** Os furos da peça tendem a produzir um efeito de concentração de tensões, aumentando significativamente o valor da tensão máxima desenvolvida durante o esforço;
- **Tipo de malha a ser utilizado: sólida ou casca?** Malhas em cascas podem reduzir bastante o tempo de cálculo (dependendo do refinamento), e apresentam maior facilidade para resolver problemas como distorção de elementos, redução de razão de aspecto, dentre outros. No entanto, uma boa malha sólida tende a apresentar melhores resultados, pois os elementos sólidos representam o comportamento real do modelo de forma mais precisa. Neste trabalho, foram feitas comparações entre malha em casca e malha sólida para uma mesma configuração, para facilitar a escolha final da melhor opção de simulação e checagem dos resultados.
- **Refinamento da malha:** Em casos onde ocorre concentração de tensão, é fundamental utilizar malhas com tamanho de elemento adequado. As regiões onde ocorre a concentração devem ter elementos menores (malha mais refinada), ao passo que regiões sem concentração de tensões podem ter elementos maiores para reduzir o tempo de cálculo.
- **Análise Linear x Não-Linear:** Como o material exibe comportamento fortemente não-linear, houve a necessidade de executar uma análise não-linear.

4.1.3 – Simulação computacional de esforços mecânicos na cruzeta

As análises foram feitas com o software MSC.MARC versão 2001. Nas malhas em casca utilizou-se o elemento "Tipo 22" do MARC, que é um elemento quadrilateral de oito nós com formulação "Thick Shell". Escolheu-se esse elemento por captar variações de tensão com maior precisão e porque a peça apresenta grande espessura, se compararmos a espessura ao tamanho de elemento nos modelos onde a malha é mais refinada.

Nas malhas sólidas, foi utilizado o elemento sólido "Tipo 127", um tetraedro de segunda ordem com 10 nós de formulação padrão, por motivos similares aos citados acima.

No caso das análises não-lineares, a solução levou em conta grandes deformações e grandes deslocamentos, sendo que em todos os casos foi utilizado o *solver* direto para sistemas esparsos (*direct sparse*).

Foi utilizado nesta simulação o valor do maior módulo de tração dos polímeros selecionados. Considerando que, quanto maior o módulo de tração, melhor o desempenho mecânico.

Na tabela 4.2 apresentam-se os casos analisados computacionalmente para três tipos de configurações distintas: Cruzeta com parede de 10 mm, Cruzeta com parede de 15 mm e cruzeta com parede de 10 mm com reforço em X central.

Tabela 4.2 – Casos analisados computacionalmente para as configurações de cruzetas com paredes de 10 mm, 15 mm e 10 mm com X central.

Configuração	Tipo de malha	Tipo de análise	Caso
10 mm	casca	linear	1
		não-linear	2
	casca refinada 1	linear	3
		não-linear	4
	casca refinada 2	linear	5
		não-linear	6
	casca sem furos	linear	7
		não-linear	8
	casca sem furos refinada	linear	9
		não-linear	10
	sólido	linear	11
		não-linear	12
	sólido sem furos	linear	13
		não-linear	14
15 mm	casca	linear	15
		não-linear	16
	casca refinada 1	linear	17
		não-linear	18
	casca refinada 2	linear	19
		não-linear	20
	casca sem furos	linear	21
		não-linear	22
	casca sem furos refinada	linear	23
		não-linear	24
	sólido	linear	25
		não-linear	26
X 10 mm	casca	linear	27
		--	--
	solido	linear	29
		não-linear	30

Tem-se então, para os modelos de 10 e 15 mm, uma malha em casca seguindo a geometria original, duas malhas em casca adicionais refinadas, duas malhas sem os furos para comparação com os modelos originais e avaliação da concentração de tensões e uma malha sólida, conforme as figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Figura 4.5 - Malha em casca original.

Figura 4.6 - Malha em casca refinada 1 (Esquerda) e casca refinada 2(direita).

Figura 4.7 - Malha em casca sem furos(esquerda) e sem furos refinada(direita).

Figura 4.8 - Comparação entre malha em casca original(esquerda) e sólida(direita) para o modelo de 10mm.

Com estes trinta casos, avaliou-se comparativamente os três modelos e também o efeito dos seguintes fatores nos resultados:

- *concentração de tensões*: através da comparação dos resultados para a malha com e sem furos;
- *tipo de malha*: através da comparação dos resultados para a malha sólida e em casca com diferentes refinamentos; com e sem furos;
- *tipo de análise*: comparação em todos os casos entre análise linear e não-linear; com e sem furos.

O objetivo final da análise destes casos foi o de determinar se os modelos resistem ao esforço aplicado, ou seja, se a tensão máxima atingida está dentro dos limites de resistência do material. A análise dos fatores citados nos dará uma maior certeza quanto ao comportamento da peça real.

4.1.4 – Resultados das simulações

As tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os valores de tensão e de deslocamento máximos para todas as configurações analisadas.

Tabela 4.3 – Resultados de tensão e deslocamento máximos para a cruzeta de 10mm de parede

Configuração	Tipo de malha	Tipo de análise	Caso	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)
10 mm	Casca	linear	1	57,7	25,4
		não-linear	2	59,2	25,4
	casca refinada 1	linear	3	64,3	26,1
		não-linear	4	70,0	26,4
	casca refinada 2	linear	5	63,5	25,6
		não-linear	6	68,7	25,9
	casca sem furos	linear	7	44,9	24,7
		não-linear	8	46,8	24,8
	casca sem furos refinada	linear	9	44,6	25,4
		não-linear	10	46,4	25,5
	sólido	linear	11	--	--
		não-linear	12	--	--
	sólido sem furos	linear	13	--	--
		não-linear	14	--	--

Tabela 4.4 – Resultados de tensão e deslocamento máximos para a cruzeta de 15mm de parede

Configuração	Tipo de malha	Tipo de análise	Caso	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)
15 mm	casca	Linear	15	38,6	16,8
		não-linear	16	39,5	16,8
	casca refinada 1	linear	17	50,1	17,1
		não-linear	18	52,7	17,2
	casca refinada 2	linear	19	49,7	17,0
		não-linear	20	52,0	17,0
	casca sem furos	linear	21	29,1	16,4
		não-linear	22	29,3	16,4
	casca sem furos refinada	linear	23	29,9	16,8
		não-linear	24	30,0	16,8
	sólido	linear	25	48,0	27,0
		não-linear	26	50,1	27,1

Tabela 4.5 – Resultados de tensão e deslocamento máximos para a cruzeta de 10mm de parede com X central.

Configuração	Tipo de malha	Tipo de análise	Caso	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)
X 10 mm	casca	linear	27	43,1	19,1
		--	--	--	--
	sólido	linear	29	48,4	27,4
		não-linear	30	50,8	27,5

Na figura 4.9, pode-se ver um gráfico com os casos agrupados aos pares (casos linear e não-linear para cada malha).

Figura 4.9 - Resultados de tensão máxima para todos os casos.

4.1.5 – Discussão dos resultados das Simulações

Agora avaliam-se os resultados das simulações realizadas, levando em conta os fatores citados anteriormente.

- *Desempenho mecânico dos modelos*

Verifica-se que, considerando o limite de resistência à tração do material Polipropileno reforçado com fibra de vidro (mais de 80 MPa), a tensão máxima em todos os casos ficou abaixo desse limite, indicando que a peça deve resistir aos 400 Kgf aplicados em cada extremidade. No entanto, algumas considerações devem ser feitas antes da conclusão final.

- **Análise linear X não-linear**

Pelo gráfico dos resultados vê-se que para cada configuração, os casos lineares e não-lineares apresentaram resultados bastante semelhantes para a tensão máxima.

A maior diferença ocorreu entre os casos 3 (64,3 MPa) e 4 (70,0 MPa), uma diferença de 8,8%. Mesmo nesse caso, o resultado teve a mesma ordem de grandeza para efeito de comparação entre a tensão máxima e a resistência do material.

Portanto, as análises lineares e não-lineares apresentaram resultados semelhantes. Pode-se assumir que, em análises futuras dessas configurações utilizando o material Polipropileno reforçado com 40% de Fibra de Vidro, podem-se realizar somente análises lineares, que são de execução mais rápidas.

- **Concentração de tensões e refinamento da malha**

Um efeito muito importante, que foi comprovado pelas análises, foi a concentração de tensões em torno dos furos, principalmente no furo central superior devido à configuração das cargas e da fixação da peça.

Na figura 4.10, ilustra-se este efeito com uma comparação entre os casos 4 e 10. O primeiro é a análise não-linear da casca original (com furos) com o maior refinamento de malha (elementos menores) e o segundo é um caso semelhante, mas sem considerar os furos, ou seja, como se a peça não fosse furada. Esses casos estão ilustrados nas figuras 4.7 e 4.8 à esquerda.

Figura 4.10 - Distribuição de tensões para os casos 4 (esquerda) e 10(direita) na região do topo no centro da peça.

Pode-se observar na figura 4.10 à esquerda que os valores de tensão na região central do topo da cruzeta são parecidos para os dois casos, estando em torno de 25 MPa, nas regiões em verde para o caso 4 (esquerda) e rosa para o caso 10 (direita).

No entanto, no caso 4, a presença do furo faz com que ocorra um efeito de concentração de tensões nas bordas deste. Os valores de tensão sofrem um aumento acentuado nessas regiões, atingindo um pico de 70 MPa, ainda assim abaixo da resistência do material.

O cálculo correto da distribuição de tensões em peças com detalhes que promovem a concentração de tensão depende muito do refinamento da malha nessas regiões. Por isso fez-se o cálculo com três refinamentos diferentes. O cálculo pode ser considerado correto quando mesmo com um maior refinamento da malha não temos mudanças significativas nos valores de tensão.

Na figura 4.11, observa-se o efeito do refinamento da malha sobre os valores de tensão nas regiões onde há concentração de tensão.

Figura 4.11 - Comparação dos casos 2,4 e 6 da esquerda para a direita. As figuras mostram o efeito do refinamento da malha sobre os valores de tensão nas regiões onde há concentração de tensão.

O valor máximo de tensão para a malha original foi de 59,2 MPa, sendo de 70,0 MPa para a malha com refinamento intermediário e de 68,7 para a malha com maior refinamento.

Esses resultados mostram que é necessário um certo refinamento para detectar concentrações de tensão, mas que o refinamento intermediário já é suficiente, pois, os resultados das malhas com refinamento são bastante semelhantes.

Como o tempo de cálculo aumenta exponencialmente com o número de elementos da malha, utiliza-se a malha menos refinada possível, no caso, a malha com refinamento intermediário.

Uma medida que pode ser aplicada no caso desse estudo é utilizar a malha sem refinamento em toda a peça e refiná-la somente na região dos furos localizados próximos ao centro da peça; assim, poupa-se tempo de cálculo e consegue-se boa precisão nos resultados.

- ***Malha sólida x malha em casca***

Os cálculos com malha sólida para espessura de 10mm não foram possíveis devido à distorção elevada de alguns elementos, o que causava a interrupção das análises. Isso não ocorreu com o modelo de 15 mm de espessura.

Comparando o resultado das malhas sólida e em casca para esse modelo, temos que os resultados para a malha sólida são muito parecidos com os resultados para as malhas em casca, tanto para os casos lineares como para os não-lineares.

4.1.6 – Conclusão das Simulações

A partir dos resultados e das discussões acima, concluiu-se:

- Todas as configurações resistem ao carregamento imposto, 400Kgf em cada extremidade, com apoio no centro, sendo que os deslocamentos máximos (flecha) ficaram todos abaixo de 30mm;
- Os furos tiveram efeito marcante no aumento da tensão máxima desenvolvida pela peça devido a efeitos de concentração de tensões. Esse efeito foi detectado pelas análises e mesmo assim a tensão máxima desenvolvida fica abaixo do limite de resistência do material;
- Como todas as configurações mostraram resistir aos 400 Kgf aplicados em cada extremidade, pode-se escolher a configuração oca com 10mm de espessura, pois é a mais econômica (mais leve);
- Apesar de as peças resistirem ao carregamento, o nível de tensão está bastante próximo do limite de resistência do material. Deve-se considerar a cruzeta com 15 mm de espessura de parede para se ter

um coeficiente de segurança maior. Uma outra hipótese de melhoria no desempenho mecânico é fazer a inserção de material metálico.

- Diante do exposto no item anterior, e considerando a execução da simulação computacional com o maior módulo de tração, conclui-se que não se torna necessária a simulação mecânica do PEAD (polietileno de alta densidade), visto que, o módulo de tração deste polímero é aproximadamente 5 vezes menor do que o do Polipropileno reforçado com fibra de vidro e com certeza não atenderia aos requisitos mecânicos exigidos por norma [2] [10].
- O material que melhor atende aos requisitos mecânicos é o Polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro, comercialmente conhecido como SG616. Este material atende a todos os requisitos deste projeto. Segundo o fabricante Borealis OPP este material apresenta 100% de reciclabilidade, podendo inclusive ser reutilizado no processo produtivo da peça, guardadas algumas condições de estabilidade química do material puro e é estável quimicamente sendo aditivado contra radiação UV e contra o efeito da temperatura visando resistir ao ataque da intempérie.

Foram necessários ensaios elétricos para determinar se o material SG616 (polipropileno com 40% de fibra de vidro) atende aos quesitos elétricos (rigidez e trilhamento) para a confecção da cruzeta; ao mesmo tempo, também foram ensaiadas as placas de PEAD (polietileno de alta densidade).

4.2 – Obtenção das Placas para Ensaio Elétricos.

A construção de uma cruzeta, conforme descrito anteriormente, necessita atender aos pré-requisitos elétricos.

Para o atendimento das solicitações elétricas, observam-se os aspectos normativos e os aspectos de expectativas de isolamento. A questão normativa define que devemos observar os limites de trilhamento e de rigidez dielétrica.

“Rigidez dielétrica de um material isolante é a relação entre a tensão aplicada entre dois eletrodos, sob o qual ocorre perfuração do isolante em condições de ensaios especificadas, e a distância entre os mesmos. A tensão de ensaio é definida como seu valor de pico dividido por $\sqrt{2}$ ” [28].

“Trilhamento elétrico é o processo que produz trilhas elétricas como resultado da ação de descargas elétricas próximas ou na superfície do material isolante. Trilha Elétrica é o caminho parcialmente condutor formado pela deterioração superficial do material isolante.” [29].

Para a realização dos ensaios elétricos foram confeccionadas placas com as dimensões permitidas para ensaios. Os ensaios elétricos foram realizados no IEE - Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP em São Paulo.

A placas de PEAD(polietileno de alta densidade) e de SG616(polipropileno reforçado com 40% de Fibra de Vidro e estabilizado quimicamente) foram obtidas através do fornecedor Borealis-OPP. Sua forma para o trilhamento elétrico é 130 x 60 x 2,6mm, aproximadamente, e para o ensaio de rigidez dielétrica é 130 x 130 x 2,6mm, aproximadamente. As amostras acima foram obtidas através de estudos elaborados juntamente com a empresa Borealis-OPP. A figura 4.12 mostra as placas de polietileno e do SG616 utilizadas nos ensaios de rigidez dielétrica e a figura 4.13 as placas utilizadas para o ensaio de trilhamento elétrico destes mesmos materiais.

Figura 4.12 – Placas confeccionadas para uso nos ensaios de rigidez dielétrica.

Figura 4.13 – Placas confeccionadas para uso nos ensaios de Trilhamento.

4.3 - Ensaios Elétricos.

O capítulo que se segue irá mostrar os resultados obtidos nos ensaios das placas dos novos materiais baseados em Polipropileno e Polietileno.

Estes ensaios determinam se os materiais atendem as características dielétricas necessárias para a confecção da cruzeta.

4.3.1 - PLACAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

4.3.1.1 - Ensaio de Rigidez Dielétrica

Foram testadas 5 (cinco) placas de polietileno fornecidas pela empresa Borealis-OPP.

O ensaio do polietileno foi realizado no dia 02/08/2001, no Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP.

- **Condições do ensaio:**

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D-149, de 1991.

- **Procedimentos adotados:**

Aplicou-se a tensão de ensaio entre as duas faces opostas, na região central dos corpos de prova, por meio de 2 eletrodos cilíndricos de latão, com bordas arredondadas, com diâmetro de 25 mm e comprimento de 25 mm. A tensão de ensaio foi elevada de modo aproximadamente linear desde 0 kV, até ser observado o início da ocorrência de perfuração do corpo de prova. Durante o ensaio, os corpos de prova foram imersos em óleo mineral isolante.

- **Resultados obtidos:**

Na tabela 4.6 encontram-se os resultados do ensaio de rigidez dielétrica realizado nas placas de polietileno.

Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios do PEAD (Polietileno de Alta Densidade)

CORPO DE PROVA	ESPESSURA MÉDIA (mm)	TENSÃO DE PERFURAÇÃO (kV)
1	2,75	>60
2	2,77	>60
3	2,76	57
4	2,77	59
5	2,76	>60

Resultando uma rigidez dielétrica maior que **21,43 kV/mm**

4.3.1.2 – Ensaio de Trilhamento Elétrico

- **Condições de ensaio:**

O ensaio foi realizado de acordo com a Norma NBR 10296/1988 [29], da ABNT. O ensaio de trilhamento foi realizado em 02/08/2001, no Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP.

- **Procedimento de ensaio:**

Os cinco corpos de prova com dimensões de 130 x 60 x 2,76 mm, aproximadamente, numerados de 1 a 5, foram lixados com água destilada e lavados com etanol diluído em água destilada.

A solução contaminante foi de cloreto de Amônio (0,1%) com Antarox (0,02%) e com condutividade de 2,54 mS/cm.

A aplicação de tensão foi realizada através do MÉTODO 2: TENSÃO DE TRILHAMENTO EM DEGRAUS.

A tensão inicial de ensaio foi de 2,50 kV e incrementada de 250 V a cada 1 hora, até atingir o ponto final de ensaio.

- **Resultado obtido:**

O ponto final do ensaio foi a tensão de 5,00 kV, na qual não foi caracterizada ocorrência de trilhamento elétrico, sendo então o circuito desligado pelo operador.

- **Classificação do Material:**

Classificação do material sob ensaio, conforme 5.5.2 da norma, utilizando o método 2: CLASSE 2 A $\geq$ 5,00 kV.

4.3.2 - PLACAS DE SG616 (PP REFORÇADO COM 40% DE FIBRA DE VIDRO)

4.3.2.1 - Ensaio de Rigidez Dielétrica

Foram testadas 5 (cinco) placas com formulação química própria, de polipropileno, para o teste de Rigidez dielétrica.

O ensaio foi realizado no dia 25/02/2002, no Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP.

- **Condições do ensaio:**

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D-149, de 1991.

- **Procedimentos adotados:**

O procedimento adotado para o ensaios do SG616 (polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro) é igual ao usado para o PEAD (Polietileno de alta densidade).

- **Resultados obtidos:**

Na tabela 4.7 encontram-se os resultados do ensaio de rigidez dielétrica realizado nas placas de polipropileno.

Tabela 4.7. Resultados dos ensaios do Polipropileno (SG 616)

CORPO DE PROVA	ESPESSURA MÉDIA (mm)	TENSÃO DE PERFURAÇÃO (kV)
1	2,69	>60
2	2,71	>60
3	2,64	>60
4	2,67	>60
5	2,68	>60

Resultando uma rigidez dielétrica maior que **22,40 kV/mm**

4.3.2.2 - Ensaio de Trilhamento Elétrico

- **Condições de ensaio:**

O ensaio foi realizado de acordo com a Norma NBR 10296/1988 [29], da ABNT.

O ensaio de trilhamento foi realizado em 06/02/2002, no Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP.

- **Procedimento de ensaio:**

O procedimento adotado para o ensaios do SG616 (polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro) é igual ao usado para o PEAD (Polietileno de alta densidade).

- **Resultado obtido:**

O ponto final do ensaio foi a tensão de 4,75 kV, quando foi caracterizada a ocorrência de fogo intenso no corpo de prova nº 2, 56 minutos após o início da aplicação do último degrau de tensão, sendo então o ensaio desarmado por corrente de trilhamento.

- **Classificação do Material:**

Classificação do material sob ensaio, conforme 5.5.2 da norma, utilizando o método 2: CLASSE 2 A 4,50 kV.

4.3.3 Conclusão dos ensaios elétricos

De acordo com os resultados, os ensaios elétricos mostram que, tanto o SG616(polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro) quanto o material PEAD(polietileno de alta densidade) atendem as exigências dielétricas estabelecidas para o desenvolvimento deste trabalho, ou sejam, encontram-se acima de 10 kV de rigidez dielétrica e acima de 2,75 kV na classe de trilhamento.

4.3.4 Conclusão Geral das Simulações e Ensaio Elétrico.

Considerando que os ensaios elétricos confirmaram as excelentes características dielétricas do SG616 e do PEAD, determinou-se o material a ser empregado na confecção da cruzeta através dos resultados da simulação mecânica e dos custos destes materiais.

A simulação mecânica efetuada com o material de maior módulo de tração mostrou que o SG616(polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro) apresenta resultados próximos dos limites mecânicos estabelecidos em norma [10]. O módulo de elasticidade do PEAD(polietileno de alta densidade) é aproximadamente 5 vezes menor do que o do polipropileno, sendo então necessário aumentar a espessura das paredes ou inserir outro material para reforço estrutural para que o mesmo apresente resultados similares ao SG616, encarecendo o produto final e tornando-o mais pesado.

Com os dados referenciados na simulação mecânica e nos ensaios elétricos, o material que apresenta as melhores características para a confecção da cruzeta é o SG616(Polipropileno reforçado com 40% de fibra de vidro).

4.4 Análise Econômica do Material SG616

Para efeito de viabilidade econômica, foi necessário conhecer as seguintes variáveis:

- Preços dos materiais
- Vida útil
- Custos de Homem - hora para reposição em campo dos elementos danificados.
- Custo de deslocamento para atendimento de ocorrência emergencial.

Outros itens poderiam estar entrando neste cálculo (lucro cessante, imagem da concessionária, etc.), mas devido à complexidade de obtenção destas outras variáveis, ateve-se às variáveis acima citadas.

4.4.1 – Preços dos Materiais.

Os preços dos materiais referem-se a preços médios de aquisição convertidos à cotação do dólar do dia 31 de Maio de 2002. A vida útil apresentada na tabela refere-se a parâmetros estabelecidos pelo Fabricante da matéria prima.

Tabela 4.8 – Dados sobre cruzetas – Preço e Vida Útil

Material	Preço (US\$) *	Vida útil (anos)
Cruzeta de madeira	5,02	5
Cruzeta de Polipropileno	23,79	20 **

* Dólar do dia 31/05/2002 - R\$ 2,522

** Segundo informações do fornecedor da matéria prima, Borealis OPP.

4.4.2 – Custo de Atendimento de Ocorrência não programada.

Considerou-se o custo (médio) de deslocamento completo para o atendimento de uma ocorrência não programada de aproximadamente *US\$ 27,76*. Estão considerados aqui os custos de combustível, Homem-hora e desgaste de veículo.

4.4.3 - Cálculos – Viabilidade econômica.

Com uma vida útil aproximada de 20 anos para a cruzeta de polipropileno, e de 5 anos para a cruzeta de madeira, pode-se afirmar que pelos menos 3 vezes haverá substituição de uma cruzeta de madeira até que uma similar de polipropileno seja retirada da rede. Podem-se ver na tabela 4.9 os preços das cruzetas a partir de sua instalação até sua retirada e inserção de uma outra .

Tabela 4.9 – Dados financeiros de cruzetas ao longo de 20 anos.

Material	Preço US\$ *	Ano 0 US\$ *	Ano 5 US\$ *	Ano 10 US\$ *	Ano 15 US\$ *	Ano 20 US\$ *
Cruzeta de madeira	5,02	5,02	32,77	32,77	32,77	5,02
Cruzeta de Polipropileno	23,79	23,79	-	-	-	23,79

* Dólar do dia 31/05/2002 - R\$ 2,522

O valor de US\$ 32,77 refere-se a soma do custo do material mais o custo de ocorrência não programada.

Considerando-se apenas um retorno de capital líquido (K) de 15%, temos:

Tabela 4.10 – Valores presentes para a cruzeta de madeira

Valor US\$	5 anos (60 meses)	10 anos (120 meses)	15 anos (180 meses)
US\$ 32,77	US\$ 16,29	US\$ 8,10	US\$ 4,03

* Dólar do dia 31/05/2002 - R\$ 2,522

A equação utilizada para cálculos de valor presente é mostrada a seguir [58]:

$$Valor\ Presente = \frac{V_{final}}{(1+i)^n} \quad (4.1)$$

Onde:

V_{final} → Valor monetário no ano desejado

i → Valor percentual do retorno de investimento desejado (Mensal ou anual)

n → Número de anos (se i for em anos) ou Número de meses (se i for em meses)

Considerando o polipropileno e a madeira para a confecção das cruzetas, a tabela 4.11 mostra o capital a ser empregado no ano zero para as referidas cruzetas em 20 anos:

Tabela 4.11 – Valores presentes para a cruzeta de madeira e do SG 616

Cruzeta	Valor (Inicial + Emerg.) US\$	5 anos (60 meses) US\$	10 anos (120 meses) US\$	15 anos (180 meses) US\$	20 anos (240 meses) US\$	Total US\$
Madeira	32,77	16,29	8,10	4,03	2,00	30,42
SG616	51,55	-	-	-	3,15	3,15

* Dólar do dia 31/05/2002 - R\$ 2,522

Na tabela 4.12 apresenta-se a tabela final com os custos de instalação e de vida das cruzetas de madeira e polipropileno:

Tabela 4.12 – Resultado financeiro da aplicação da Cruzeta de Polipropileno reforçado com 40% de Fibra de vidro (SG616) x Madeira

CRUZETA	Custo inicial Material	Custo ao final de 20 anos	Custo total ao final de 20 anos	Diferença
Madeira	US\$ 5,02	US\$ 30,42	US\$ 35,44	US\$
Polipropileno (SG616)	US\$ 23,79	US\$ 3,15	US\$ 26,94	(8,50)

* Dólar do dia 31/05/2002 - R\$ 2,522

A diferença entre a cruzeta de polipropileno e a cruzeta de madeira mostra um valor negativo, demonstrando que, apesar de o custo de instalação inicial da cruzeta de polipropileno ser mais alto que o da cruzeta de madeira, ao longo de sua vida útil a cruzeta de polipropileno se paga e ainda há uma economia de dinheiro em relação à cruzeta de madeira.

É muito claro que além dos custos de instalação e de vida útil, existem as melhorias inseridas no sistema com a instalação da cruzeta de polipropileno, como por exemplo a redução de ocorrências de desligamento por descarga atmosférica, devido ao aumento de NBI.

Pelos cálculos efetuados a cruzeta poderia ter um custo de até \$ 23,79 (vinte e três dólares e setenta e nove centavos) que ainda assim estaria se igualando ao custo ao longo da vida, da cruzeta de madeira.

Portanto, demonstra-se que a cruzeta de polipropileno é viável financeiramente, assim como atende aos requisitos técnicos.

CAPÍTULO 5

Conclusão

No desenvolvimento deste trabalho, reuniu-se informação suficiente para usar um compósito polimérico à base de polipropileno que atendesse às exigências mecânicas, elétricas e de durabilidade temporal na construção de cruzetas. Isto irá contribuir para a redução de interrupções indesejadas nos sistemas elétricos de distribuição e conseqüentemente para uma redução de custos, tanto no investimento do novo material comparado ao seu antecessor, quanto nos custos operacionais das companhias.

As simulações mecânicas mostram que, para análises futuras do SG616, podem ser utilizadas somente análises lineares, devido à pequena diferença que esta apresentam em relação às não lineares. Isto reduz o tempo de execução computacional.

Os ensaios elétricos mostraram que o SG616 apresenta alta rigidez dielétrica e excelente resistência ao trilhamento.

Para uma aplicação comercial, verificou-se que o SG616 é financeiramente viável, principalmente pela economia gerada durante sua vida útil e adicionalmente pelas economias geradas através dos desligamentos evitados nos sistemas elétricos.

Há uma tendência global em harmonizar o meio ambiente e as ações humanas. Esta cruzeta é reciclável e de fácil manuseio, substituindo a de madeira.

Ao termino deste trabalho e com a análise dos resultados da pesquisa, estabelece-se com clareza a aplicabilidade técnica e econômica da cruzeta polimérica nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

5.1. Trabalhos Futuros

A sequência deste trabalho será o desenvolvimento de mão francesa polimérica e outras alternativas de construção de cruzeta para os sistema de distribuição de energia.

Como observação final, este estudo só tem sua aplicabilidade efetiva quanto acompanhado de um ótimo estudo de sobretensão e a correta aplicação de pára-raios de qualidade ao longo das linhas de distribuição. Espera-se que a continuidade de pesquisas de novos materiais e a melhoria dos mesmos permitam a ampliação da vida útil média das redes de distribuição de energia elétrica e a redução de custos operacionais das companhias, permitindo assim ganhos para as concessionárias e para os seus clientes através da modicidade tarifária.

ANEXO A

Definição de Sistemas de Distribuição de Energia

Para entender melhor um sistema de distribuição de energia, encontram-se definidos alguns conceitos básicos segundo [13] [8]:

- Um Sistema de Distribuição é parte de um sistema de potência destinada à distribuição de energia elétrica.
- Distribuição de Energia Elétrica é o transporte de energia elétrica a partir dos pontos onde se considera terminada a transmissão (ou subtransmissão) até a medição de energia, inclusive.
- Uma rede aérea é a rede elétrica em que os condutores, geralmente nus, ficam elevados em relação ao solo e afastados de outras superfícies que não os respectivos suportes.
- Uma Rede de Distribuição Aérea Urbana (RDU) é uma rede elétrica destinada ao fornecimento de energia em tensão de distribuição, cujo traçado se desenvolve na área configurada urbana.
- Uma Rede de Distribuição Aérea Rural (RDR), é a rede elétrica destinada ao fornecimento de energia em tensão de distribuição, cujo traçado se desenvolve na área configurada rural.

ANEXO B

Gráficos de rigidez dielétrica, resistividade volumétrica e constante dielétrica de alguns polímeros.

A figura 1 mostra o gráfico de rigidez dielétrica de alguns materiais.

Figura 1 – Gráfico de rigidez dielétrica de alguns polímeros e outros materiais.

A figura 2 mostra o gráfico de resistividade volumétrica de alguns polímeros e outros materiais.

Figura 2 – Gráfico de resistência volumétrica de alguns polímeros e outros materiais.

A figura 3 mostra o gráfico com os valores da constante dielétrica de alguns polímeros e outros materiais.

Figura 3 – Gráfico com os valores da constante dielétrica de alguns polímeros e outros materiais.

ANEXO C

Critérios para o desenvolvimento das equações (3.1) e (3.2) e Planilha com os Parâmetros dos Polímeros.

1. Desenvolvimento da Equação (3.1)

Devido as diferenças entre as unidades dos parâmetros dos polímeros e a necessidade de se obter uma indicação daqueles que atendessem as características deste trabalho, desenvolveu-se a equação (3.1), com as seguintes considerações:

- Estabeleceu-se o nota variando de 1 até 5.
- Dos dez polímeros, utiliza-se os valores do limite superior e inferior, para determinar a distribuição das notas no intervalo de 1 a 5.
- O Cálculo da nota tem duas fases distintas na equação: a primeira é o cálculo do fator de escala, que é igual para todas os polímeros e é definido pelos valores mínimo e máximo dentro da propriedade que está sendo analisada; enquanto a segunda parte calcula a posição relativa da propriedade do polímero dentro do conjunto em questão. A multiplicação destas duas fases estabelece a nota do polímero em relação aos demais. Soma-se 1 ao resultado do cálculo para obter o início da escala igual a 1.

$$Nota = \left[\left(\frac{4}{(m_{ap} - m_{ep})} \right) * (v_p - m_{ep}) \right] + 1 \quad (3.1)$$

Onde:

map : → Maior valor da propriedade entre os polímeros;

mep : → Menor valor da Propriedade entre os polímeros;

vp : → Valor da propriedade do polímero;

2. Desenvolvimento da Equação (3.2)

Para obter-se a matriz de classificação dos polímeros, necessitou-se elaborar uma equação para o cálculo final dos índices.

As seguintes considerações foram feitas:

- Todos os parâmetros selecionados são importantes, entretanto o custo deverá ser o elemento crucial para o desenvolvimento do projeto.
- O desempate, caso haja, deve ser feito considerando as propriedades elétricas e o módulo de elasticidade.

A nota final é a soma das notas das propriedades do polímero, dividida pelo sua nota de custo. Assim a nota final é dada por:

$$Nota\ Final = \frac{(me + ri + rd)}{c} \quad (3.2)$$

onde:

C: Nota de Custo

Me: Nota do Módulo de Elasticidade

Ri : Nota da Resistência ao Impacto

Rd : Nota de Rigidez Dielétrica

Cabe ressaltar que estas equações visam selecionar os melhores polímeros para as simulações e os ensaios elétricos, evitando-se assim, que sejam gastos tempo e dinheiro em um polímero que não atende as características de projeto.

3. Valores das propriedades dos polímeros selecionados.

Na tabela I a seguir, encontram-se os valores de cada propriedade dos polímeros selecionados.

Tabela I - Valores de cada propriedade dos polímeros selecionados.

TIPO DE POLÍMERO	DENSIDADE	Custo R\$/Kg	Custo Dólar	NOTA	Rigidez dielétrica	NOTA PROPRIEDADES DIELÉTRICAS	Módulo de Elasticidade	NOTA Módulo de Elasticidade	RECICLABILIDADE	RESISTÊNCIA AO IMPACTO	NOTA RESISTÊNCIA AO IMPACTO	PROCESSO PRODUTIVO	Nota Final
PP + 40%FV *	1,24	R\$ 3,70	\$ 1,73	1,334	20	3,760	6334	5,000	5	2,20	1,056	INJEÇÃO / EXTRUSÃO	7,36
PEAD *	0,95	R\$ 2,58	\$ 1,07	1,000	18	3,208	1300	1,574	5	13,97	1,652	EXTRUSÃO / INJEÇÃO / SOPRO	6,63
PP HOMOPOLÍMERO *	0,90	R\$ 2,65	\$ 1,10	1,021	20	3,760	1210	1,709	5	2,20	1,056	INJEÇÃO/EXTRUSÃO/SOPRO	6,39
PMMA **	1,18	R\$ 4,30	\$ 1,78	1,514	19	3,401	3000	2,858	3	1,10	1,000	INJEÇÃO / EXTRUSÃO	4,80
PTFE - Poli (Tetrafluoretileno) **	2,10	R\$ 5,00	\$ 2,07	1,723	20	3,760	357	1,161	0	21,32	2,025	SINTERIZAÇÃO DE PÓ	4,03
PC (Policarbonato) *	1,12	R\$ 8,00	\$ 3,31	2,619	14	1,692	2500	2,537	5	80,00	5,000	INJEÇÃO / SOPRO	3,52
PA 6.6 *	1,13	R\$ 8,52	\$ 3,53	2,774	23	5,000	2500	2,537	3	8,09	1,354	INJEÇÃO	3,21
Resina Poliuretana (termofixo) *	1,05	R\$ 6,90	\$ 2,86	2,290	12	1,000	107	1,000	0 *		5,000	RIM	3,06
Poliéster insaturado *	1,10	R\$ 9,36	\$ 3,88	3,025	15	1,828	3350	3,083	0	1,10	1,000	PULTRUSÃO	1,95
FIBERGLASS (POLIÉSTER+FV) **	1,80	R\$ 15,98	\$ 6,61	5,000	14	1,609	3350	3,083	0	1,10	1,000	HAND LAY-UP	1,14

* Os preços foram obtidos da revista Plástico Moderno de Fevereiro de 2002

** Os preços foram obtidos em pesquisa junto a fornecedores

Valor Dólar em 01/02/2002 R\$ 2,4153

Valor Dólar em 10/03/2003 R\$ 3,5220

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **BRASIL. Leis, etc.** (1978). *Portaria 046 de 17 de abril de 1978 – Condições técnicas e a qualidade dos Serviço de Energia Elétrica*. Brasil
- [2] **Norma ELEKTRO** (1991). *Cruzetas de Madeira de 2000 mm*. Campinas.
- [3] **Norma ELEKTRO** (1995). *Cruzetas de Madeira de 2400 mm*,. Campinas.
- [4] **BRASIL. Leis, etc.** (1981). *Lei n.o 6.938 de 31 de Agosto de 1981 - Política Nacional de Meio Ambiente*. Brasil
- [5] **SILVA, José F. R.** (2001). *Relatório Técnico sobre vida útil de cruzetas em sistemas de Distribuição de Energia*. Campinas. (Relatório Técnico Elektro)
- [6] **HACKAM, Reuben.** *Outdoor HV Composite Polymeric Insulators* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 6 N.o 5, pp 557 – 585, October 1999.
- [7] **CENTRO DA MEMÓRIA ELÉTRICA NO BRASIL** (2001), *Energia Elétrica no Brasil – Breve Histórico 1880-2001*, Rio de Janeiro.
- [8] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1982). *NBR 5433 Redes de distribuição aérea rural de energia elétrica*. Rio de janeiro

- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). NBR 5434 *Redes de distribuição aérea urbana de energia elétrica*. Rio de Janeiro
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 8458 – *Cruzetas de Madeira para Redes de Distribuição de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro.
- [11] NORMA ELEKTRO (2001). ND01 – *Materiais e equipamentos para redes aéreas de distribuição de Energia Elétrica*. Campinas
- [12] NORMA ELEKTRO (2001). ND12 – *Redes Protegidas Compactas-Critérios para projetos e Padronização de estruturas*. Campinas.
- [13] NORMA ELEKTRO (2002). ND22 – *Projeto de Redes Aéreas Urbanas de Distribuição de Energia Elétrica*. Campinas.
- [14] NORMA ENERSUL (1998). ESP 501 – *Especificação de Suporte para Isolador tipo Pilar*. Campo Grande.
- [15] NORMA ELEKTRO (1990). DE/001/TC – *Aplicação do Sistema Monofilar com Retorno a Terra (MRT)*. São Paulo.
- [16] NORMA CEMAT (2001). NTE 009 – *Redes Monofilares com Retorno por Terra-Critérios para Projetos e Montagem 13,8 kV e 34,5 kV*. Cuiabá.
- [17] SOUZA, Paulo M. N. (2002). *Metodologia do Processo de Planejamento do Sistema Elétrico de Distribuição*. In: Encontro Técnico Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica Congresso de rede Subterrânea, Belo Horizonte, 2002. Minas Gerais.
- [18] LIEBEL, S.A; Mueller, R.E. *Douglas Flir Crossarms: solid vs. Laminated*

- comparision*. Transmission and Distribution Conference, 1994. Pages 581-586
- [19] **BARBOSA, Frederico W.S.** (2002). *Tipos de Sistemas e Custos Associados*. In: Encontro Técnico Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica. Congresso de Rede Subterrânea, Belo Horizonte, 2002. Minas Gerais.
- [20] **ROCHA, ADELIA C. P.**, (1990). *Materiais Plásticos para a Construção Civil*. Lisboa, LNEC.
- [21] **AGNELLI, J A.** *Introdução a Materiais Poliméricos e Materiais na Produção Industrial 2*. Pub. do departamento de Engenharia e Produção, Universidade Federal de São Carlos, SP, 1996.
- [22] **SICHERI, E.**, (1996). *Plásticos na Construção Civil. Publicação para as Disciplinas de Materiais de Construção, USP, São Carlos, S.P.*
- [23] **GALLO, J. B. ,** (1996). *Incorporação de Hidróxido de Alumínio, tratado superficialmente, em Polietileno de baixa Densidade, para Isolamento de Cabos Elétricos de Baixa Tensão , Dissertação de Engenharia de Materiais UFSCAR, São Carlos, S.P.*
- [24] **MANO, Eloísa Biasotto.** *Polímeros como Materiais de Engenharia*. Edição Edgard Blücher Ltda, 1ª ed. São Paulo, 1991.
- [25] **LICHTENSTEIN, N & FLAUZINO, W.** *Tintas e Plásticos na Construção Civil*. Publ. Escola Politécnica/USP, São Paulo, 1997.
- [26] **HALL, James F.**, *History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 1, pp 376 – 385, January 1993.

- [27] ALTAFIM, R.A.C.; GONZAGA, D.P.; MURAKAMI, C.R.; ATIQUÊ JUNIOR, W. ; CHIERICE, G.O. and AGNELLI, J.A.M. (2001). *Analysis of performance of polymeric insulators manufactured with polyurethane resins*. In: 2001 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society. June, Eindhoven, Holanda, p.191-194.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). NBR 5405 – *Determinação de Rigidez Dielétrica sob Frequência Industrial*
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). NBR 10296 – *Material Isolante Elétrico – Avaliação de sua Resistência ao Trilhamento Elétrico e Erosão sob Severas Condições Ambientais*
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 8459 – *Cruzetas de Madeira – Dimensões*
- [31] R. BARSCH, H. JAHN, J. LAMBRECHT, *Test Methods for Polymeric Insulation Materials for Outdoor HV Application* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 6 N.o 5, pp 668 – 675, October 1999.
- [32] KUNIKAZU IZUMI AND KENZO KADOTOMI , *Applications of Polymeric Outdoor Insulation in Japan*, – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 6 N.o 5, pp 595 – 604 , October 1999.
- [33] A T. Bulinsk, J. P. Crine, B. Noirhomme, R. J. Densley and S. Banji , *Polymer Oxidation and Water Treeing* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 5 N.o 4, pp 558 – 570, August 1998.

- [34] **M. M. Ueki and M. Zanin**, *Influence of Additives on the Dielectric Strength of High-Density Polyethylene* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 6 N.o 6, pp 876 – 881, December 1999.
- [35] **B. S. Lee and D. C. Lee**, *Surface Degradation Properties of Ultraviolet Treated Epoxy/Glass Fiber* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 6 N.o 6, pp 907 – 912, December 1999.
- [36] **G. C. Montanari and D. K. Das-Gupta**, *Polarization and Space Charge Behavior of Unaged and Electrically Aged Crosslinked Polyethylene* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 7 N.o 4, pp 474 – 479, August 2000.
- [37] **C. Mayoux**, *Degradation of Insulation Materials under Electrical Stress* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 7 N.o 5, pp 590 – 601, October 2000.
- [38] **R. J. Ramos, R. F. Bianchi, D. T. Balogh and R. M. Faria**, *Conductivity of carbon Black-PE Composites as a Function of Temperature and UV Aging* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 7 N.o 6, pp 855 – 859, December 2000.
- [39] **J. L. Augé, C. Laurent, D. Fabiani and G. C. Montanari** – *Investigation DC Polyethylene Threshold By Space Charge – Current and Electroluminescence Measurements* - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 7 N.o 6, pp 797 – 803, December 2000.
- [40] **D. K. Das-Gupta** – *Dielectric and related Molecular Processes in Polymers* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 1, pp 6 – 14, February 2001.

- [41] C. Mayoux, J. J. Martinez-Veja, J. Guastavino and C. Laurent, *Towards a Better Knowledge of Insulating Polymers under Stress* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 1, pp 58 – 71, January 2001.
- [42] J. V. Champion, S. J. Dodd, Y. Zhao, A S. Vaughan, M. Brown, A E. Davies, S. J. Sutton and S. G. Swingler, *Morphology and The Growth of Electrical Trees in a Propylene/elthylene Copolymer* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 2, pp 284 – 292, April 2001.
- [43] M. Wübbenhorst, J. van Turnhout, B. J. B. Folmer, R. P. Sijbesma and E. W. Meijer, *Complex Dynamics of Hydrogen Bonded Self-Assembling Polymers* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 3, pp 668 – 675, June.
- [44] S. C. J. Meskers, C. Im, H Bässler, J. Hübner and M. Östreich, *Relaxation of Excitons and Charge Carriers in Polymers* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 3, pp 321 – 328, June 2001.
- [45] X. Wu, G. Chen, A E. Davies, R. N. Hampton, S. J. Sutton and S. G. Swingler, *Space Charge Measurements in Polymeric HV Insulation Materials* – IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 4, pp 725 – 730, August 2001.
- [46] I. L. Hosier, A. Vaughan, D. Patel, S. J. Sutton and S. G. Swingler, *Morphology and Electrical Conduvity in Polyaniline/Polyolefin Blends* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 4, pp 698 – 704, August 2001.
- [47] G. Teyssedre, C. Laurent, A. Aslanides, N. Quirke, L. A. Dissado, G. C. Montanari, A. Campus and L. matinotto, *Deep Trapping Centers in Crosslinked Polyethylene Investigated By Molecular Modeling and*

- Luminescence Techniques* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 5, pp 744 – 752, October 2001.
- [48] **T. Paluka**, *Dielectric Relaxation Modeling in Complex Polymer Systems* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 6, pp 936 – 941, December 2001.
- [49] **B. X. Du**, *Discharge Energy and dc Tracking Resistence of Organic Insulation Materials* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 8 N.o 6, pp 897 – 901, December 2001.
- [50] **A. Schneuwly**, P. Gröning, L. Schlapbach, C. Irrpgang and J. Vogt, *BreakDown Behavior of Oil-Impregnated Polypropylene as Dielectric in film Capacitors*– IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol 5 N.o 6, pp 862 – 868, December 1998.
- [51] **BILLMEYER, F. W.** - *Textbook of polymers Science*. John Wiley & Sons – Intercience publication, New York, janeiro, 1984.
- [52] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS** (1978) *ASTM D 149 – Standard Test Methods for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric of Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies*. Philadelphia.
- [53] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1992). NBR 6936 – *Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão*
- [54] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1981). NBR 6937 – *Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão – Dispositivos de Medição*

- [55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1981). NBR 6936 – *Técnicas de Ensaaios Elétricos de Alta Tensão – Guia de Aplicação para Dispositivos de Medição*.
- [56] MANO, Eloísa B. *Introdução a Polímeros*. Edição Edgard Blücher Ltda, 3ª ed. São Paulo, 1985.
- [57] NIEDERMEIER, R.K. (1990). *Relatório: Aplicações de Materiais Poliméricos em Alta Tensão*. OHIO BRASS COMPANY. Wadsworth, OH 44281.
- [58] VIEIRA SOBRINHO, José Dutra. *Matemática Financeira*. Edição Atlas, 7ª ed. São Paulo, 2002.