UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM ESCUDO POLIMÉRICO PARA MINIMIZAR A QUEBRA DE ISOLADORES DE VIDRO POR VANDALISMO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JULIANA DE ALMEIDA YANAGUIZAWA

RECIFE, NOVEMBRO DE 2003

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM ESCUDO POLIMÉRICO PARA MINIMIZAR A QUEBRA DE ISOLADORES DE VIDRO POR VANDALISMO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

JULIANA DE ALMEIDA YANAGUIZAWA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA

COORDENADOR DO CURSO: PROFª RITA DE CÁSSIA LIMA

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. SEVERINO LEOPOLDO URTIGA FILHO (UFPE)

PROF. DR. EDSON GUEDES DA COSTA (UFCG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Aos meus pais.

“ Mas onde se achará a sabedoria? E onde está o lugar do entendimento? O homem não conhece o valor dela, nem se acha ela na terra dos viventes. O abismo diz: ‘Ela não está em mim’; e o mar diz: ‘Não está comigo’. Não se dá por ela ouro fino, nem se pesa prata em câmbio dela. O seu valor não se pode avaliar pelo ouro de Ofir, nem pelo precioso ônix, nem pela safira. O ouro não se iguala a ela, nem o cristal; ela não se trocará por jóia de ouro fino; ela faz esquecer o coral e o cristal; a aquisição da sabedoria é melhor que a das pérolas. Não se lhe igualará o topázio da Etiópia, nem se pode avaliar por ouro puro. Donde, pois, vem a sabedoria, e onde está o lugar do entendimento? Está encoberta aos olhos de todo vivente e oculta às aves do céu. O abismo e a morte dizem: ‘Ouvimos com nossos ouvidos a sua fama’. Deus lhe entende o caminho, e ele é quem sabe o seu lugar. Porque ele perscruta até as extremidades da terra, vê tudo o que há debaixo dos céus. Quando regulou o peso do vento e fixou a medida das águas; quando determinou leis para a chuva e caminho para o relâmpago dos trovões, então, viu Ele a sabedoria e a manifestou; estabeleceu-a e também a esquadrinhou. E disse ao homem: Eis que o temor do Senhor é a sabedoria, e o apartar-se do mal é o entendimento”.

Jó 28: 12-28.

AGRADECIMENTOS

Ao término desta dissertação de mestrado, agradeço àqueles que me apoiaram na realização deste trabalho.

Acima de tudo e principalmente, quero agradecer a Deus, por abençoar meus estudos e me capacitar a ser perseverante na busca de meus sonhos.

Em especial agradeço a meus pais que, mesmo longe, torceram por mim; obrigada pelo incentivo aos estudos, apoio e amor em todos os momentos de minha vida.

Ao namorado Eudes, pelo incentivo, paciência, ajuda e compreensão nos momentos difíceis que encontrei durante esta jornada.

Ao professor Armando Shinohara, pela contribuição dedicada em sua orientação; pela oportunidade de participar deste projeto; “importante é investir no conhecimento, pois é uma das coisas que não se pode nos tirar”.

À Chesf, pelo financiamento do projeto “Isolamento Mínimo”; aos engenheiros Gustavo Xavier e Denis Maciel, pelas informações fornecidas em nome da empresa.

Ao doutor Manfred Schwartz, pela colaboração e prontidão na execução deste trabalho, e pelas medições realizadas no laboratório da Química Fundamental (UFPE); à Eliete e todos os funcionários da Central Analítica, pelas medições de UV-Vis, IV e RMN.

Ao LAT da UFCG, em particular ao prof. Edson Guedes, pela colaboração na execução dos ensaios de alta tensão.

Ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) pelas medições de densidade óptica.

A todos os amigos da UFPE, pelo convívio diário, companheirismo e amizade. Obrigada pela força e ajuda prestadas ao longo deste trabalho.

À UFPE, pelo oferecimento deste programa de mestrado acadêmico.

À CAPES, pela minha bolsa de mestrado.

À Profª Raquel Lima (UFRN), pelas medições de FRX.

À Embrarad, pela irradiação das amostras de vidro.

Ao DEE da USP, pelas medições de tensão disruptiva.

RESUMO

Os isoladores são utilizados para isolar os condutores da terra, fixando-os e suportando-os nas linhas de transmissão. Na atualidade, existem vários tipos de isoladores. Especificamente, os isoladores de vidro possuem uma vida útil relativamente longa, podendo chegar a 40 anos ou mais. Do ponto de vista construtivo, o vidro do isolador é temperado e tem excelentes propriedades dielétricas; possui formato de um “chapéu” e é fixado entre duas partes metálicas denominadas campânula e pino. Eletricamente, o isolador de vidro comporta-se como um circuito RC. Em condições a seco e sem poluição,o isolador de vidro, na sua forma íntegra, suporta uma tensão próxima de 80 kV, e não mais que 12 kV quando quebrado. No campo, o isolador está sujeito a um ambiente vulnerável a cargas de natureza eletromecânica, à ação de intempéries e danificações por vandalismo. A quebra de isoladores de vidro por vandalismo é uma realidade nacional, responsável por um número significativo de desligamentos não programados, atingindo um valor em torno de 75%.

Na presente dissertação, foi conduzido um estudo para projetar e construir um mecanismo de proteção da parte vítrea do isolador e avaliar a viabilidade de utilizá-lo nas linhas de transmissão. Dentre os vários materiais dielétricos, o policarbonato foi selecionado como material para escudo protetor, baseando-se num procedimento de engenharia.

A resistência mecânica do sistema de escudos foi avaliada com ensaios de impacto e balístico. Ensaios de alta-tensão foram realizados para avaliar a performance do escudo na presença de descargas na freqüência industrial (60 Hz) e impulso de manobra no laboratório de alta tensão. Ademais, foi realizado um estudo sobre a possibilidade de aumentar a proteção do escudo de policarbonato contra raios ultravioleta provenientes do sol, utilizando radiação ionizante sobre o vidro.

A resistência ao impacto do escudo de policarbonato de 6 mm de espessura foi avaliada com equipamento de impacto com pêndulo. Por exemplo, a quebra do vidro do isolador protegido com o escudo foi verificada com energia de impacto próxima de 515 J – enquanto que sem proteção a quebra do vidro ocorreu com aproximadamente 205 J de energia.

No ensaio balístico, projéteis disparados com Magnum 44, equivalente a um rifle, somente conseguiram quebrar até 3 isoladores de vidro em cadeia quando cada isolador é protegido com o escudo.

Em termos de ensaios com alta-tensão, o policarbonato praticamente não exerceu influência sobre os valores de tensão disruptiva de uma cadeia de isoladores de vidro. Em freqüência industrial, uma cadeia com 16 isoladores de vidro, possuindo apenas 7 unidades inteiras – distribuídas quase uniformemente ao longo da cadeia – apresentou valor de tensão disruptiva igual a 500 kV sem escudos, contra 505 kV com 10 escudos (colocados nos isoladores mais superiores da cadeia). O policarbonato apresentou boa estabilidade dimensional quando da ocorrência de arco elétrico, e não propiciou a formação de chama.

Medidas espectroscópicas de ultravioleta mostraram que a camada de proteção contra a radiação UV presente nas chapas de policarbonato permite que o material absorva substancialmente os raios nocivos e aumente sua durabilidade. Por outro lado, a técnica de irradiação do vidro com raios-γ possibilitou uma melhoria substancial nos valores de absorção UV do vidro dos isoladores. O *cut-off* que era observado em torno de 325 nm passou para valores acima de 600 nm após a

irradiação com diferentes doses de raios-γ de Co-60. Ensaios adicionais sobre o fator tempo e temperatura, como tratamento térmico das amostras irradiadas feito a 70°C por sete dias, mostraram que o vidro não sofreu degradação com relação ao poder de absorção UV induzido pela irradiação com raios-γ. As propriedades do vidro, características de vidros soda-cal, estabilizaram-se após os primeiros 30 dias de irradiação.

Em termos do custo de cada placa de policarbonato sugerido para o escudo, foi encontrado o valor de R$ 27,73. Por ser leve (aproximadamente 485 g), o escudo de policarbonato não prejudica o desempenho mecânico da cadeia de isoladores. O material é facilmente usinável, sendo também inofensivo ao meio ambiente e não atrai a atenção de curiosos nas linhas de transmissão pela ausência de coloração.

ABSTRACT

Electrical insulators are largely employed in the hot lines to isolate the electricity conductors from the earth and suppor them at the towers. Nowadays, there are several kinds of isolatores for such application. Particularly, the glass insulators are largely employed in Brazil, and it is known to have a long useful life, able to reach more than 40 years. From the constructive point of view, the glass insulator is made of tempered glass and has an excellent dielectric property, and it can treated as a RC electrical circuit. In good environment,dry and without pollution, a glass insulator supports up to 80 kV in air, and not more than 12 kV when it is broken. In the field, the glass insulators are subjected to a vulnerable environment and they are damaged by the vandalism actions. Energy interruption due to the vandalism is a national problem and responsible for a significant number of breakout, reaching a value of around 75%.

At the present work, a study was conducted to build and test a system of protection to protect the glass part of insulator from the vandalism, using an insulator material. Among several insulating materials, the polycarbonate was selected based on an engineering procedure. The mechanical resistance of a protection system was evaluated with impact test in the laboratory and ballistic test. High-tension test was conducted with the industrial frequency (60 Hz) and impulse. Furthermore, to evaluate and improve the life of polycarbonate in the field, ultraviolet spectroscopy study and irradiation of glass were conducted.

A test of the resistance to impact on the protection system made of polycarbonate of 6 mm in thickness was evaluated with a equipment of impact with pendulum setting. As a result, values of 515 J and 205 J were obtained for a system with and without polycarbonate protection. In the ballistic test, projectiles from Magnum 44, equivalent to a rifle, could break up to 3 glass insulators of the chain when each insulator was protected with a plate of polycarbonate. In terms of test with high tension, the polycarbonate practically did not showed significant influence on the values of disruptive tension. With the industrial frequency test, a chain with 16 glass insulators, with 9 broken insulators and 10 plates of polycabornate installed, found a close values, 500 kV.

The policarbonato showed a good dimensional stability after the occurrence of electric discharge in the breakdown test, and it did not allowed the flame ignition. Ultraviolet spectroscopic measurement showed that the UV protection layer on policarbonato is effective to absorb subtantially the harmful rays. On the other hand, the technique to irradiate the soda-lime-silica glass with γ-ray can improve substantially the values of absorption of UV cut-off. As received glass showed the cut-off value at 325 nm. After irradiation, the cut-off value passed to 600 nm. In order to test the effect of temperature on the cut-off value, the glass samples were heated at 70°C for seven days. As a result, no significant changes in the values of cut-off was observed. In terms of fading, 30 days after irradiation with γ-ray, no change was observed. Furthermore, an evaluation of cost efective calculation on application of plate of polycarbonate as a protection system, a value of R$ 27,73 was found.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇAO..... 1

1.1 Apresentação do Problema e Motivação..... 2

1.2 Objetivos..... 4

1.3 Isoladores de Vidro para Linhas de Alta-Tensão..... 5

2. ENSAIOS DE IMPACTO E BALÍSTICO PARA AVALIAÇÃO DO ESCUDO DE POLICARBONATO..... 9

2.1 Introdução..... 10

2.1.1 Seleção do Material para Confecção do Escudo de Proteção para Isoladores de Vidro..... 11

2.2 Policarbonato: Características e Propriedades..... 13

2.2.1 Introdução..... 13

2.2.2 Avaliação da Absorção de Radiação Ultravioleta pelo Policarbonato..... 15

2.3 Ensaio de Impacto com Pêndulo em Isoladores de Vidro protegidos com Escudo de Policarbonato..... 18

2.3.1 Cálculo da Energia de Impacto para Projeto de um Equipamento de Ensaio de Impacto sob Tração..... 18

2.4 Materiais e Métodos..... 23

2.4.1 Construção de um Equipamento para ensaio de Impacto sob Tração em Isoladores de Vidro..... 23

2.4.2 Avaliação da Tensão Residual no Vidro do Isolador..... 26

2.4.3 Ensaio de Impacto com Pêndulo..... 28

2.4.4 Ensaio Balístico..... 29

2.5 Resultados e Discussão..... 30

2.6 Conclusões..... 35

3. ENSAIOS DE ALTA-TENSÃO COM ESCUDO DE POLICARBONATO E DETERMINAÇÃO DE SEU VALOR ECONÔMICO..... 37

3.1 Ensaios do Escudo de Policarbonato com Alta-Tensão..... 38

3.1.1 Considerações sobre a distribuição de Tensão em Cadeia de Isoladores de Vidro..... 38

3.2 Materiais e Métodos..... 39

3.3 Resultados e Discussão..... 44

3.4 Conclusões..... 48

3.5 Determinação do Valor Econômico do Escudo Polimérico..... 48

3.5.1 Ficha de Custos..... 50

4. IRRADIAÇÃO DO VIDRO DOS ISOLADORES PARA MINIMIZAR A DEGRADAÇÃO DO ESCUDO DE POLICARBONATO POR RAIOS UV..... 51

4.1 Introdução..... 52

4.2 Irradiação do Vidro do Isolador para Minimizar a Degradação do Escudo de Policarbonato..... 55

4.3 Materiais e Métodos..... 56

4.4 Resultados e Discussão..... 57

4.5 Conclusões..... 67

5. CONCLUSÕES..... 68

5.1 Conclusões..... 69

5.2 Trabalhos Futuros..... 70

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 71

7. ANEXOS E APÊNDICES..... 77

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Problema e Motivação

Os isoladores de vidro têm a função de isolar eletricamente as linhas de transmissão de alta tensão, bem como sustentar mecanicamente os cabos aéreos de transporte de energia fixados nas estruturas metálicas, nas tensões de 69 kV até 500 kV. Os isoladores de vidro possuem uma vida útil de mais de 40 anos, mas são os elementos mais vulneráveis de uma linha, pois estão submetidos a cargas de natureza eletromecânica, à ação de intempéries e depredação. São projetados de forma a terem os caminhos na superfície do vidro os mais longos possíveis a fim de diminuir a possibilidade de ocorrência de descarga elétrica entre suas partes metálicas.

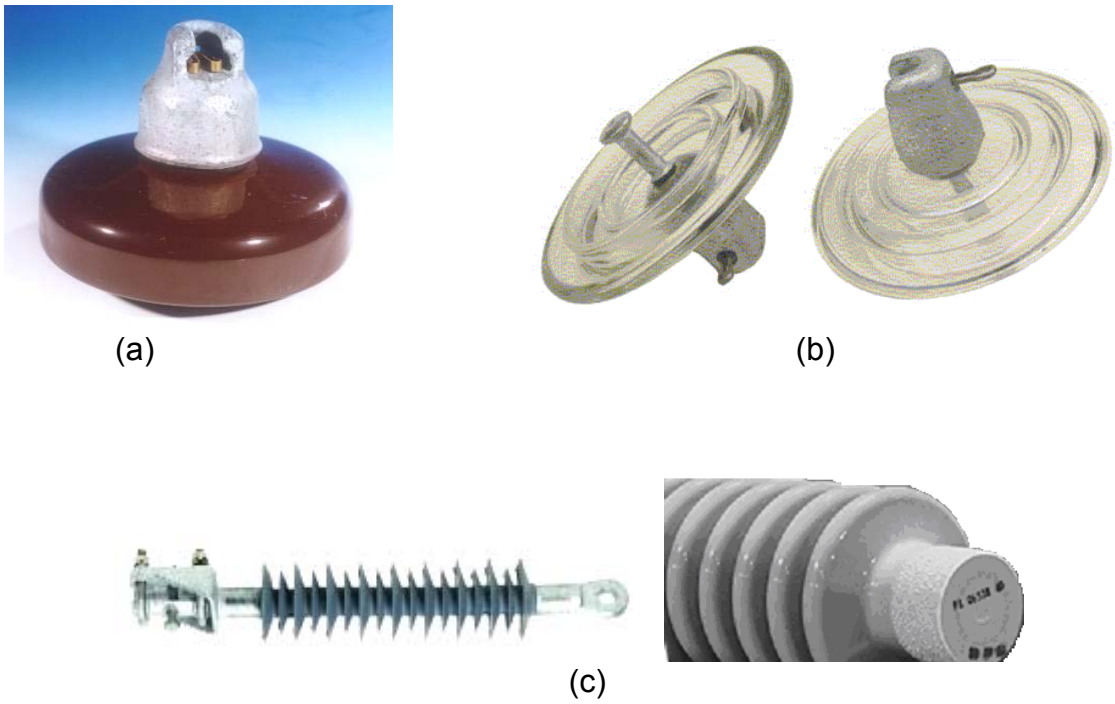
Além do vidro, existem no mercado isoladores de alta tensão de porcelana e poliméricos (figura 1.1). Segundo Pavlik (1989), os primeiros isoladores fabricados pela Hewlett (em 1900) em forma de disco, e posteriormente aperfeiçoados por Locke, adquiriram a forma atual somente em 1920, quando foram solucionados os problemas de matéria-prima e processos industriais. Os primeiros isoladores eram feitos de porcelana, mas em 1937, na Inglaterra, foram desenvolvidos isoladores com vidro temperado, pois apresenta melhor desempenho termo-mecânico e permite visualizar danos resultantes de sobretensão ou arco de potência – o isolador de porcelana esmaltado pode acusar tão somente uma perfuração interna, muitas vezes não detectável na inspeção visual, enquanto que o vidro, nesta situação, normalmente apresenta quebra da saia, de fácil visualização na inspeção de linhas. No final da década de 70, foram criados os isoladores poliméricos (também chamados de compostos), feitos de bastão de fibra de vidro e resina, e revestidos com borracha de silicone ou EPDM (“Ethylene-Propylene-Diene-Monomer”) (Nigri, 1999; Bernstorf, R.A. *et al.*, 2000; Meloni *et al.*, 2001). De acordo com Garcia *et al*. (1997) e Meloni et al. (2001), os isoladores poliméricos têm sido utilizados comercialmente há mais de 25 anos, e apresentam significativas vantagens em relação aos isoladores de vidro, como menor peso, resistência ao vandalismo, melhor desempenho quanto aos efeitos da poluição enquanto novos, estrutura menos agressiva no aspecto visual e menor tempo gasto na manutenção de cadeias danificadas. As maiores desvantagens do isolador polimérico decorrem da possibilidade de ocorrência de defeitos internos não detectáveis por inspeção visual, como trilhamento interno, erosão, trincas no núcleo e penetração de umidade (Meloni *et al*., 2001), além do custo ser mais elevado em comparação aos isoladores de vidro e porcelana.

Mesmo com o uso de isoladores poliméricos, os isoladores de vidro ainda representam a maior parcela de isoladores instalados no Brasil. Por exemplo, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) – empresa brasileira de produção, transmissão e comercialização de energia elétrica a nove estados do norte-nordeste – possui cerca de 18 mil quilômetros de linhas de transmissão e mais de 3 milhões de isoladores de vidro instalados, os quais correspondem a 80% do total de isoladores utilizados pela empresa – sendo 10% de porcelana e 10% poliméricos (Xavier, 2003).

A quebra de isoladores de vidro por vandalismo é uma realidade nacional e mundial (Naito, 1993; Meloni *et al*., 2001). Segundo os dados da Chesf, entre os anos de 1988 e 2001 (13 anos) ocorreram 339 desligamentos em suas linhas de transmissão, dos quais 75% foram originados de atos de vandalismo. Os 25% restantes foram causados por descargas atmosféricas, falhas de fabricação, interferência de terceiros, falhas de projetos e de manutenção. Cerca de 40% dos desligamentos por vandalismo foram automáticos e 60% foram intencionais, conforme mostra a figura 1.2. A figura 1.3 apresenta um isolador de vidro inteiro e

outro quebrado. O vandalismo nas cadeias (pencas) de isoladores das linhas de transmissão consiste de danificação e depredação provocadas pelo homem, resultando em quebra da parte vítrea do isolador. Os desligamentos intencionais (programados pela Chesf) ocorrem porque, uma vez quebrados os isoladores de vidro nas linhas energizadas, não há segurança para os eletricistas efetuarem a troca das unidades danificadas, quando o número de isoladores for menor que 7 inteiros numa cadeia de 230 kV. Assim, a vida humana é colocada em risco durante o trabalho de substituição dos isoladores, caso a linha permaneça energizada após o ato de vandalismo e o número de isoladores seja inferior a 7.

Os desligamentos causados por vandalismo implicam em (i) custos e despesas para a substituição dos isoladores quebrados; (ii) prejuízo com as vendas, pois a empresa deixa de fornecer energia elétrica no tempo em que a linha permanece desligada; (iii) e ainda existe aplicação de multa por entidades governamentais – Operadora Nacional de Sistemas Elétricos (ONS), Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) – que chega a ser 5 vezes maior que o prejuízo causado em 1 hora de desligamento.



(a) (b) (c)

Figura 1.1 – Fotos de isoladores para linhas de transmissão de alta tensão: (a) Isolador de porcelana; (b) Isoladores de vidro; (c) Isoladores poliméricos.

Por conta do elevado número de desligamentos causados por vandalismo, vem crescendo nos últimos anos o número de isoladores poliméricos instalados nas linhas de alta tensão (Garcia *et al.*, 1997; Kobayashi *et al*., 2000). Entretanto, o uso de isoladores poliméricos no Brasil ainda é muito inferior em relação aos isoladores de vidro, devido ao alto custo, e por ser tratar de um novo produto com pouco histórico em relação ao seu desempenho em médio-longo prazo; os polímeros são grandemente influenciados por agentes do meio ambiente, principalmente pela radiação ultravioleta (UV), causando envelhecimento do material e alterando suas propriedades mecânicas e elétricas. Encontra-se hoje experiência no exterior com a utilização de isoladores poliméricos em campo por 20 anos, com bons e maus resultados, dependendo da formulação do revestimento e demais processos de

fabricação do produto (Meloni *et al.*, 2001). A deterioração por envelhecimento é a principal causa das falhas (64%) nos isoladores poliméricos (Garcia *et al.*, 1997), mas, como todo material polimérico, este tipo de isolador é suscetível ao campo elétrico e seu envelhecimento é irreversível.

Em função da existência de uma legislação mais rigorosa ao setor elétrico brasileiro, da demanda crescente e da necessidade de fornecimento de energia com qualidade, é necessário minimizar os desligamentos das linhas de transmissão oriundos de vandalismo.

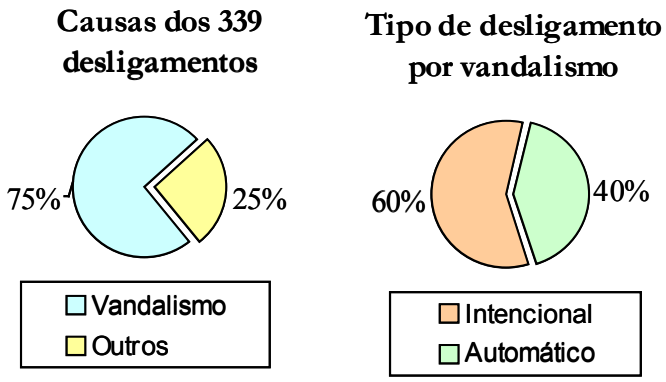


Figura 1.2 – Estatísticas apresentadas pela CHESF sobre vandalismo nas linhas de alta tensão, entre os anos de 1988 e 2001.

(a) (b) (c)

Figura 1.3 – Fotografias de comparação entre isoladores de vidros tipicamente utilizados na Chesf: (a) Inteiro; (b) Quebrado (“sabugo”); (c) Detalhe das trincas no interior de um isolador de vidro quebrado após a retirada do pino metálico e cimento.

1.2 Objetivos

Dentro do atual cenário de atos de vandalismo existentes nas cadeias de isoladores de vidro, e na tentativa de desenvolver metodologias capazes de minimizar a depredação e quebra de isoladores de vidro nas linhas de transmissão d energia elétrica, este trabalho tem por objetivo desenvolver e ensaiar um sistema de proteção do vidro dos isoladores. O sistema consiste de dispositivos (escudos) confeccionados em material polimérico (policarbonato), capaz de oferecer resistência mecânica contra impacto de projéteis, inclusive de armas de fogo, garantindo a integridade mínima necessária ao funcionamento da cadeia de isoladores durante sua vida útil. Este trabalho insere-se num projeto mais global

sobre desenvolvimento de abordagens corretivas e preventivas para recuperação de isolamento mínimo de uma cadeia de isoladores danificados por vandalismo e que permaneceu energizada com menos de 7 isoladores inteiros numa linha de 230 kV, financiado pelo programa P&D da Chesf com aval da Aneel do ciclo 2000-2001.

Avaliou-se também um processo de minimizar a degradação do escudo de policarbonato pela ação dos raios solares, principalmente porque o índice de radiação solar do nordeste brasileiro é considerado um dos mais altos do mundo. Em Recife, Pernambuco, a média anual da radiação solar diária é de 5,3 kWh/m² (Tiba *et al.*, 1998). Sendo assim, neste trabalho as propriedades ópticas do vidro do isolador foram caracterizadas com técnicas de espectroscopia de infravermelho, ultravioleta e luz visível, bem como foi desenvolvido um processo para aumentar a proteção UV ao escudo de policarbonato através de irradiação gama no vidro.

- Objetivo geral:

Desenvolver e avaliar um sistema de proteção de material isolante para minimizar a quebra por vandalismo de isoladores de vidro, nas cadeias de suspensão (verticais) das linhas de transmissão.

- Objetivos Específicos:

- Identificar as funções e os fatores críticos de sucesso do escudo de proteção a ser desenvolvido para isoladores de vidro.
- Selecionar o material adequado para a confecção do escudo, que atenda as funções desejadas para o produto.
- Confeccionar o escudo a partir do material selecionado.
- Realizar ensaios de impacto e ensaios balísticos para comprovar a eficácia do escudo desenvolvido na proteção da parte vítrea dos isoladores.
- Realizar ensaios de alta tensão com escudos colocados em isoladores de vidro para avaliar (i) o comportamento do escudo diante da presença do campo e descargas elétricas; (ii) a interferência do escudo sobre o desempenho elétrico da cadeia de isoladores de vidro.
- Avaliar o processo de degradação do material escudo contra a ação de radiação nociva (ultravioleta).
- Determinar o valor econômico do produto desenvolvido.
- Estudo e utilização da técnica de irradiação gama em isoladores de vidro, para aumentar a absorção de radiação nociva (UV) pela saia de vidro e, conseqüentemente, minimizar a degradação do escudo de proteção desenvolvido.

1.3 Isoladores de Vidro para Linhas de Alta-Tensão

A característica elétrica de um isolador de vidro pode ser representada por um circuito tipo RC mostrado na figura 1.4. O isolador de vidro típico para linhas de transmissão está representado na figura 1.5. A tabela 1.1 apresenta as características técnicas de um isolador de vidro, modelo concha-bola, enquanto que a tabela 1.2 mostra valores de desempenho elétrico deste isolador sob diversas condições.

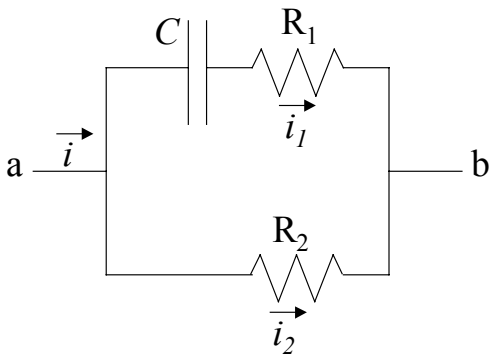
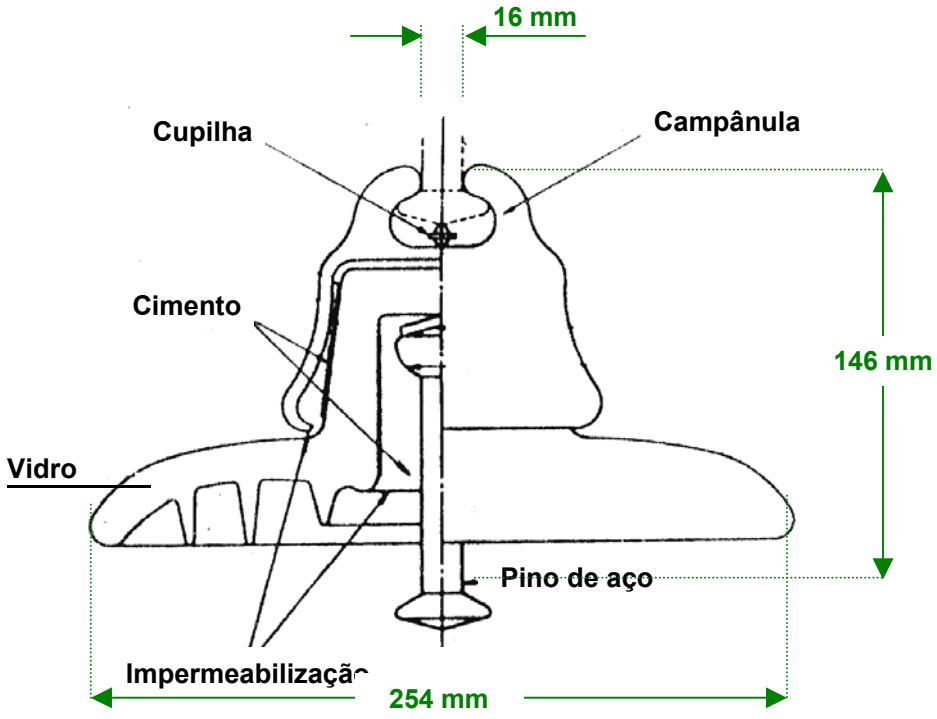


Figura 1.4 – Representação de um isolador de vidro real através de um circuito elétrico RC, situado entre os pontos *a* e *b* (*C*: capacitância; R_1: perda dielétrica; i_1: corrente de carga e de absorção que atravessam *C* e R_1; i_2: corrente de fuga; R_2: resistência superficial do isolamento). Em um dielétrico perfeito, R_1=0 e R_2=∞. (Rezende, 1977).

(a)



(b)

Figura 1.5 – (a) Fotografia de um isolador de vidro típico para alta tensão; (b) Componentes do isolador e principais dimensões (Pavlik, 1989).

Pela figura 1.5 observa-se que um isolador de vidro é formado basicamente por três peças:

- Campânula de ferro maleável ou galvanizado a fogo, provida com engate tipo concha-bola, complementada com cupilha de bloqueio de bronze ou de aço inoxidável;
- Corpo (saia) de vidro temperado;
- Pino metálico de aço.

O vidro dos isoladores de alta tensão é um silicato pertencente à família soda-cal (*soda-lime*[1] *silica glass*). A composição típica deste vidro é: 71% a 73% de SiO_2, 12% a 14% de Na_2O e 10% a 12% de CaO. Os óxidos Na_2O e CaO diminuem o ponto de fusão do vidro, por isso os vidros soda-cal são fáceis de serem conformados. A quantidade de 1% a 4% de MgO é adicionada ao vidro soda-cal para prevenir a devitrificação; a adição de 0,5% a 1,5% de Al_2O_3 é usada para aumentar sua durabilidade. Vidros soda-cal são usados também para invólucros de lâmpadas incandescentes, garrafas, janelas, blocos de vidro para construção, embalagens de alimentos e fármacos etc. (Alves *et al.*, 2001).

O processo de fabricação do vidro de isoladores está mostrado na figura 1.6. Para a formação da saia, o vidro é prensado, em estado pastoso, em moldes metálicos, na temperatura aproximada de 1200°C, normalizado a 700°C e temperado com brusco resfriamento por rajadas de ar frio na parte inferior da saia de vidro. Este processo de têmpera aumenta enormemente a resistência mecânica do vidro (Pavlik, 1989; Alves *et al.*, 2001). Uma característica marcante é que vidros temperados, ao serem quebrados, sofrem um processo de "estilhaçamento", produzindo numerosos e pequenos fragmentos. A figura 1.7 ilustra fragmentos de vidro de um isolador quebrado.

As campânulas, antes de serem chumbadas com cimento ao corpo de vidro temperado, são revestidas nas bordas com feltro, constituídos de fios de nylon ou poliéster fixados com cola. A finalidade do revestimento consiste em impedir o contato direto entre a campânula e o vidro durante o processo de vibração, evitando a danificação do corpo e também o processo de deterioração, devido à presença de álcalis, sódio e potássio na composição química do vidro. A parte do pino metálico a ser cimentada dentro do corpo de vidro é revestida, por imersão, com verniz especial. Este envernizamento destina-se a modificar o estado da superfície da haste para aumentar a resistência aos esforços de compressão e do cisalhamento do cimento quando o isolador é submetido à tração (Pavlik, 1989).

Tabela 1.1 – Principais características técnicas de um isolador inteiro, tipo suspensão, modelo concha-bola (segundo norma NBR 7109).

Carga mecânica de tração	80000 N
Tração de rotina	40000 N
Diâmetro D	254 mm
Passo P	146 mm
Peso	4,8 kg
Tensão disruptiva[2] em freqüência industrial a seco	80 kV
Tensão disruptiva em freqüência industrial sob chuva	50 kV

(Rezende, 1977).

[1] Soda (do inglês) = Na_2O; Lime (do inglês) = CaO.

[2] Tensão disruptiva: valor de tensão responsável pela ocorrência de descarga elétrica (arco elétrico) em um meio dielétrico.

Tabela 1.2 – Valores de tensão disruptiva para um isolador de vidro, modelo concha-bola, sob diversas condições.

Características do isolador		Tensão disruptiva (kV)	
		Literatura*	Experimental**
Inteiro	Isolador seco, sem poluição	80	73
	Isolador sob chuva sem poluição	50	50
	Isolador sob neblina sem poluição	---	20
	Isolador inteiro sob neblina com poluição	---	7
Quebrado	Isolador sem poluição	---	12
	Isolador com cola de silicone, sem poluição	---	6

(*) Rezende (1977). (**) Dados fornecidos pelo laboratório de alta tensão da UFCG, Paraíba.

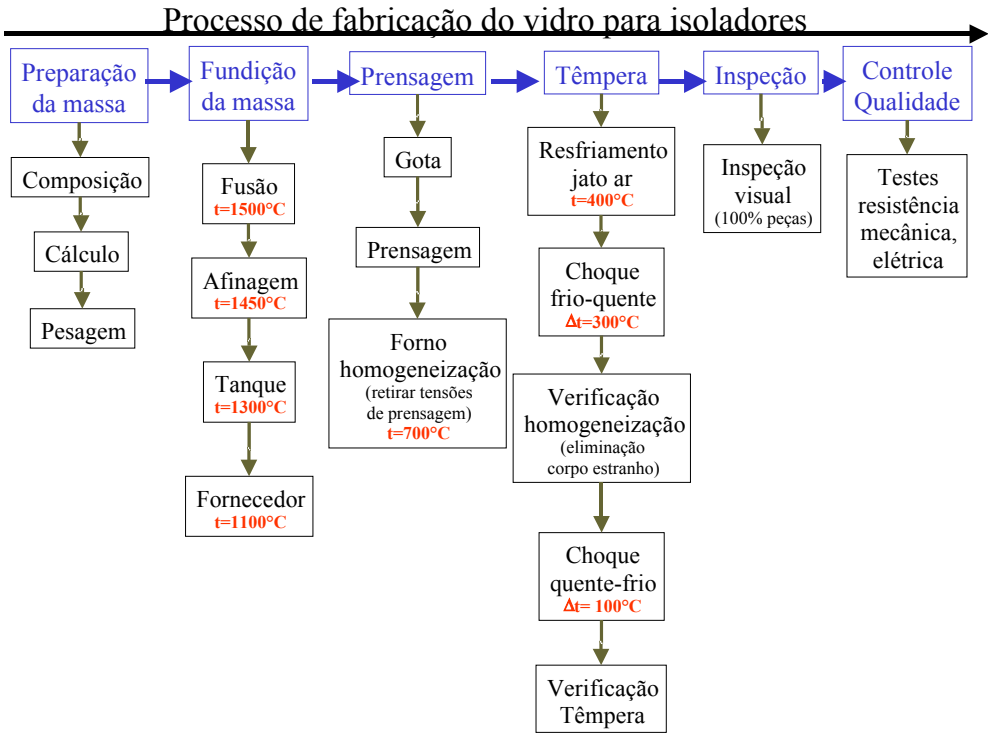
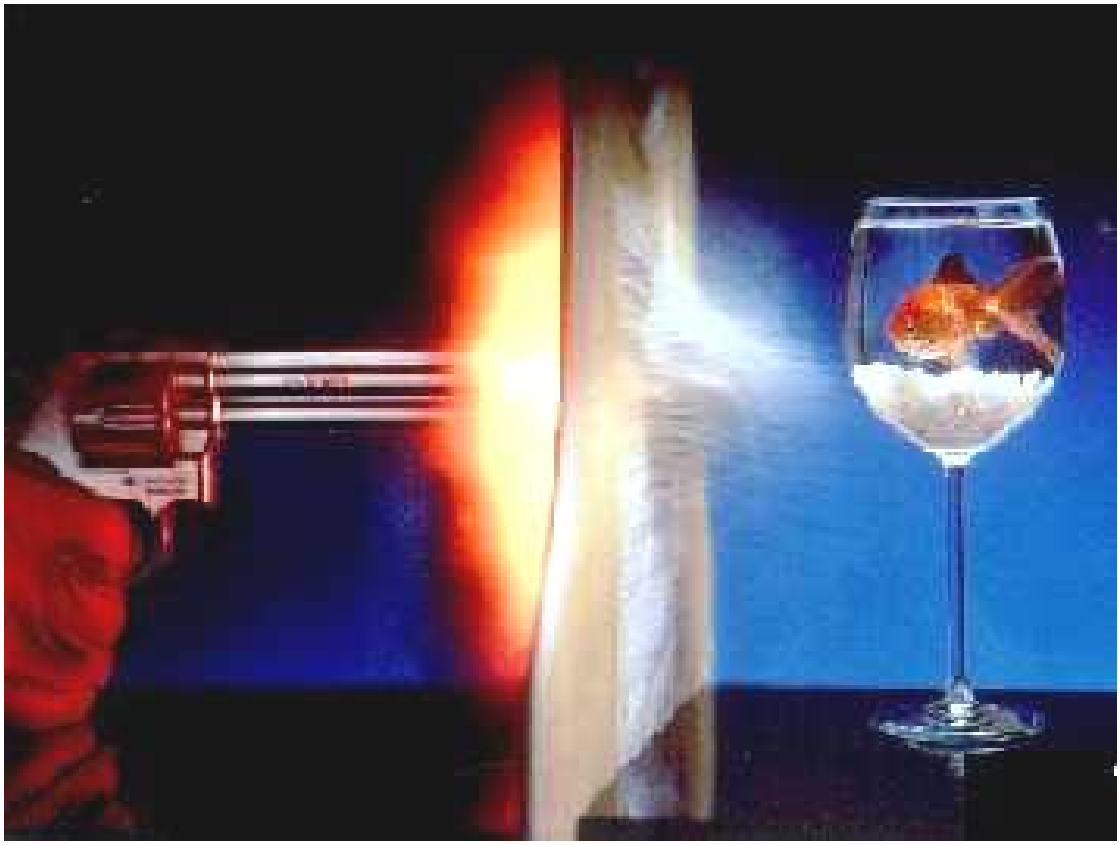


Figura 1.6 – Resumo do processo de fabricação do vidro de isoladores de alta tensão produzidos pela empresa Electrovidro.

(a) (b)

Figura 1.7 – Fotografia de fragmentos de vidro de um isolador quebrado. (a) Vista geral; (b) Vista ampliada mostrando um determinado padrão típico de fratura.



2. ENSAIOS DE IMPACTO E BALÍSTICO PARA AVALIAÇÃO DO ESCUDO DE POLICARBONATO

2.1 Introdução

No desenvolvimento do escudo de proteção para minimizar a quebra de isoladores de vidro por vandalismo, inicialmente foram levantados os possíveis materiais a serem utilizados na confecção da peça. O material do escudo deve atender algumas funções, consideradas fatores críticos de sucesso do produto, que são:

A. *Resistência ao impacto:* o material deve resistir ao impacto de projéteis, principalmente armas de fogo. A resistência ao impacto, expressa em J/m ou em kgf·mm/mm, representa a tenacidade à fratura do material - quantidade de energia absorvida antes da fratura.

B. *Propriedades dielétricas:* o material precisa oferecer resistência ao arco (descarga elétrica), uma vez que o escudo será instalado nas linhas de transmissão de energia elétrica. De acordo com Mano (1996), a resistência ao arco é uma medida das condições de perda das propriedades dielétricas ao longo da superfície de um isolante, devido à formação de caminhos condutivos na superfície do material. Altos valores de resistência ao arco representam maior resistência à falha elétrica; está relacionada à rigidez dielétrica em altas temperaturas. A rigidez dielétrica, expressa em kV/mm, indica em que grau um material é isolante; é medida pelo valor de tensão (kV) que o material pode suportar até a ocorrência de descarga elétrica através de sua espessura (mm). A falha do material é revelada pela excessiva passagem de corrente elétrica, com a destruição total da peça, acompanhada de efeitos luminosos, ruídos e descargas parciais.

C. *Poder extintor de fogo:* havendo uma combustão causada por uma descarga elétrica por exemplo, o material do escudo deve extinguir a chama, ou seja, deve possuir um auto-retardamento da sua inflamabilidade.

D. *Propriedades térmicas:* o material deve suportar altas temperaturas mantendo boa estabilidade dimensional, pois o escudo estará exposto à radiação solar durante a maior parte de sua vida útil. Segundo Mano (1996), o aquecimento do material faz com que os átomos e moléculas vibrem mais rápido e com maior amplitude, causando a expansão do volume do material. A expansão térmica é avaliada pelo coeficiente de dilatação térmica linear, expresso em mm/mm/°C, que é o alongamento relativo da peça por unidade de temperatura.

E. *Durabilidade e resistência a intempéries*: o material deve oferecer máxima resistência a intempéries, principalmente contra os raios UV. Conforme descrito na literatura (Mano, 1996), a exposição do material ao calor e luz ultravioleta provenientes do sol, em presença de ar, pode causar maior degradação envolvendo reações químicas de oxidação, mudança na coloração, surgimento de fissuras, rachaduras, etc. O material também deve ter boa resistência à água, avaliada pela absorção de umidade, que altera as propriedades mecânicas e elétricas, além de aumentar as dimensões da peça.

F. *Baixa densidade*: o material do escudo necessita ser leve para não sobrecarregar a sustentação mecânica da estrutura metálica da torre de alta

tensão. A densidade (medida em g/cm³) reflete a estrutura química e a organização molecular do material.

G. *Baixo custo*: é desejável que o material tenha baixo preço de compra, a fim de que a fabricação do escudo seja economicamente viável.

H. *Facilidade de aquisição:* é importante que o material seja de fácil comercialização e aquisição, de preferência com fornecedor no mercado nacional.

I. *Usinabilidade:* é necessário que o material tenha boas características de processamento e usinagem, a fim de seja possível utilizar diferentes operações no processo de fabricação, como serra, torno, fresa, polimento, etc.

J. *Ecologicamente correto:* em virtude da importância com a preservação do meio ambiente, o material do escudo não deve causar impacto ambiental, nem ser tóxico ao ser humano.

K. *Estética:* é desejável que o material tenha coloração suave e discreta para não despertar ainda mais a atenção de vândalos sobre a cadeia de isoladores.

2.1.1 Seleção do Material para Confecção do Escudo de Proteção para Isoladores de Vidro

Com o propósito de se otimizar a busca pelo material mais adequado à confecção do escudo, foi utilizada uma ferramenta da Engenharia de Produto chamada *análise funcional*. De acordo com Gurgel (1995), a análise funcional permite organizar as funções em ordem decrescente de importância ao projeto do produto, priorizando as mais relevantes – dado que nenhum material existente consegue atender simultaneamente todas as funções requeridas. Esta ferramenta consiste na elaboração de uma matriz que pondera a importância relativa de cada uma das funções do produto, seguindo o critério abaixo:

- *1 ponto* → Relativamente mais importante
- *2 pontos* → Mais importante
- *3 pontos* → Muito mais importante

Para cada uma das funções listadas acima (de *A* até *K*), são atribuídas notas de importância relativa de forma que, no final da análise, cada função possuirá um total de pontos acumulados. As funções mais importantes serão aquelas que obtiverem maior pontuação. A figura 2.1 mostra a matriz com as respostas obtidas. A tabela 2.1 apresenta a pontuação total obtida pelas funções, também indicada graficamente na figura 2.2. As notas da matriz foram atribuídas pela autora com base na problemática e objetivos a serem alcançados no presente trabalho.

Como se pode observar pela figura 2.2, as funções *A* (resistência ao impacto), *B* (propriedades dielétricas) e *E* (durabilidade e resistência a intempéries) são, nesta ordem, as três mais importantes no projeto do escudo de proteção para isoladores de vidro. Isto significa que o material escolhido para a fabricação do produto deve atender primeiramente a função *A* e depois as funções *B, E, C, D, F*, ..., respeitando a ordem de importância estabelecida na tabela 2.1.

Os materiais metálicos não podem ser escolhidos, devido à condutividade elétrica que apresentam, nem os cerâmicos, pela fragilidade ao impacto. Restando a família dos polímeros e dos compósitos para a seleção, foram pesquisados na literatura os materiais mais adequados às exigências do produto, de acordo com a análise funcional. Os resultados da pesquisa apontaram para a seleção dos seguintes materiais:

- policarbonato (PC);
- polietileno de alta densidade (HDPE);
- nylon® 6.6 (poliamida, PA).

Estes materiais foram selecionados porque atendem satisfatoriamente as necessidades (funções) do produto. As propriedades destes materiais encontram-se em anexo. Para a escolha do material do escudo, os três materiais candidatos foram avaliados com a atribuição de notas de desempenho referentes ao atendimento das funções de *A* até *K*. As notas foram dadas a cada material de acordo com os valores das propriedades observadas na tabela em anexo, seguindo o critério descrito por Gurgel (1995) e mostrado abaixo:

- 1 ponto: pior desempenho relativo;
- 2 pontos: médio desempenho relativo;
- 3 pontos: melhor desempenho relativo.

As funções foram ponderadas com os pesos obtidos na última coluna da tabela 2.1. Admitiu-se ser possível atribuir a mesma nota para mais de um material, caso o desempenho dos mesmos venha a ser igual. A pontuação total de cada material (tabela 2.2) foi calculada pelo somatório da sua pontuação obtida em cada função, que, por sua vez, é dada pelo produto do peso da função pela nota atribuída ao material.

Os resultados da tabela 2.2 mostram que o policarbonato é o material que obteve maior nota em relação ao nylon 6.6 e ao polietileno de alta densidade. As maiores vantagens do policarbonato foram: resistência ao impacto, durabilidade e resistência UV, propriedades térmicas, usinabilidade e estética. Por conta disso, o policarbonato foi selecionado para a fabricação do escudo.

A	***B***	***C***	***D***	***E***	***F***	***G***	***H***	***I***	***J***	***K***
A	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A2	A3
	B	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B2	B3
		C	C2	E1	C1	C2	C2	C2	C1	C3
			D	E1	D1	D2	D2	D2	D1	D3
				E	E1	E3	E3	E3	E2	E3
					F	F2	F2	F2	F1	F3
						G	G1	I1	J1	G3
							H	I1	J1	H3
								I	J1	I3
									J	J3
										K

Figura 2.1 – Matriz de análise funcional. Os dados na cor rosa representam as notas atribuídas para a importância relativa de cada função.

Tabela 2.1 – Pontuação total obtida para cada função a ser atendida pelo material do escudo.

Função		Total de pontos	Importância	Relat%
A	Resistência ao impacto	22	1°	19,64
B	Propriedades dielétricas	21	2°	18,75
C	Poder extintor de fogo	13	4°	11,60
D	Propriedades térmicas	11	5°	9,82
E	Durabilidade e resistência a intempéries	17	3°	15,18
F	Baixa densidade	10	6°	8,93
G	Baixo custo	4	9°	3,57
H	Facilidade de aquisição	3	10°	2,68
I	Usinabilidade	5	8°	4,46
J	Ecologicamente correto	6	7°	5,37
K	Estética	0	11°	0
	Soma:	112	Soma:	100

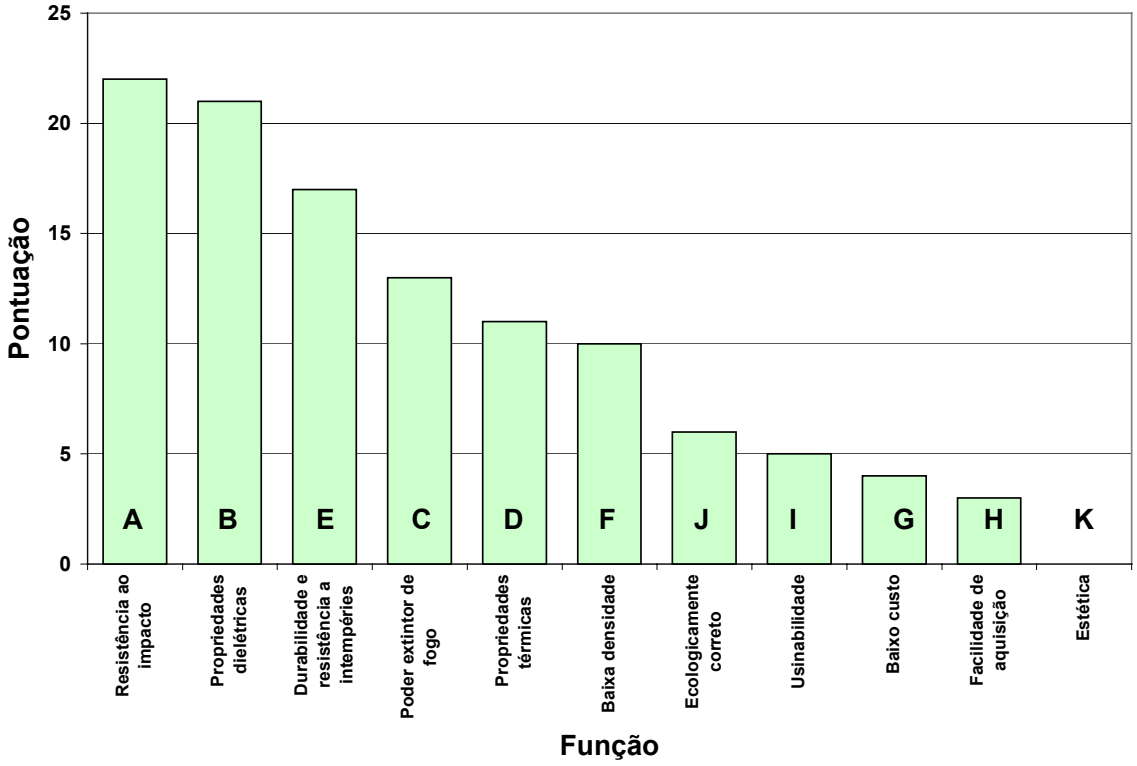


Figura 2.2 – Funções, em ordem decrescente de importância, que devem ser atendidas pelo material do escudo.

2.2 Policarbonato: Características e Propriedades

2.2.1 Introdução

O policarbonato (PC) é um termoplástico de engenharia com elevado peso molecular (Albuquerque, 1999); é grandemente utilizado por causa de suas excelentes propriedades (mecânicas, químicas, elétricas e físicas), que incluem

transparência, alta resistência ao impacto, resistência à água, dureza e resistência térmica (Okamoto, 2001). O policarbonato possui este nome devido à presença de grupos carbonatos na sua cadeia principal, como mostra a figura 2.3. A transparência do policarbonato (até 88% de transmitância de luz visível) é explorada em diversas aplicações como janelas, escudos de segurança, lentes de contato, blindagem de automóveis etc. (Ramani & Ranganathaiah, 2000).

As resinas são encontradas para uso geral e para extrusões em variados tipos especiais que fornecem propriedades específicas ou determinadas características de processamento, como retardamento de chama, resistência a intempéries e radiação ultravioleta. Também são encontrados sob forma de chapas extrudadas. Em seu estado natural essas resinas apresentam-se incolores e transparentes como água (GE Plastics, 2003).

Os grupos benzênicos presentes na cadeia principal tornam a molécula de policarbonato muito rígida e com uma estrutura amorfa. Sua regularidade e os grupos laterais polares conferem um alto valor de temperatura de transição vítrea (T_g)[3] ao policarbonato (145°C); isto implica em elevados valores para as propriedades térmicas do material, e estabilidade dimensional muito boa (GE Plastics, 2003).

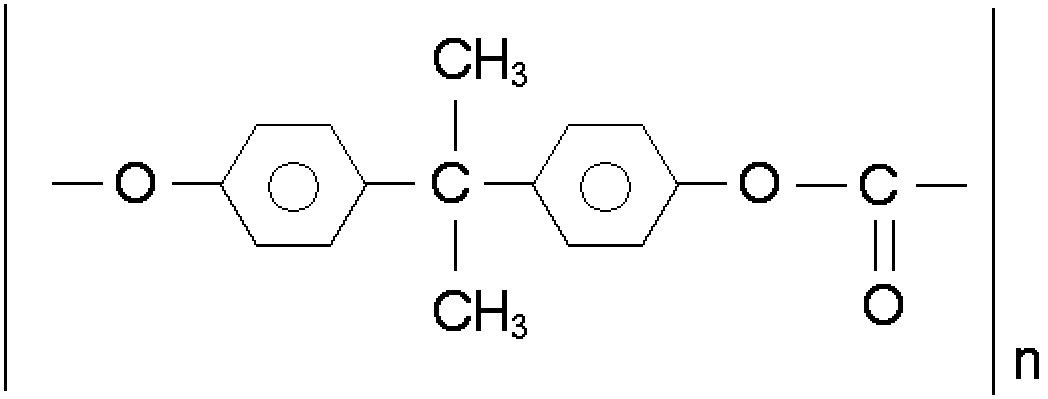


Figura 2.3 – Estrutura do policarbonato (Araújo *et al.*, 1998).

A transparência da chapa de policarbonato é muito semelhante a um vidro temperado/laminado, porém com possibilidade de ser curvada a frio e com uma resistência a impacto muito superior - cerca de 250 vezes maior que a do vidro temperado, segundo Albuquerque (1999). Existem no mercado brasileiro chapas de policarbonato contendo tratamento, em uma das faces, contra o ataque dos raios ultravioleta, com garantia de 10 anos contra o amarelamento (figura 2.4).

[3] A temperatura de transição vítrea está associada à região amorfa dos polímeros. Representa a temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares, devido à rotação de grupos laterais em torno das ligações primárias, torna-se restrita pela coesão molecular. Abaixo da temperatura de transição vítrea, desaparece a mobilidade das cadeias macromoleculares, e o material torna-se mais rígido (Mano, 1996).

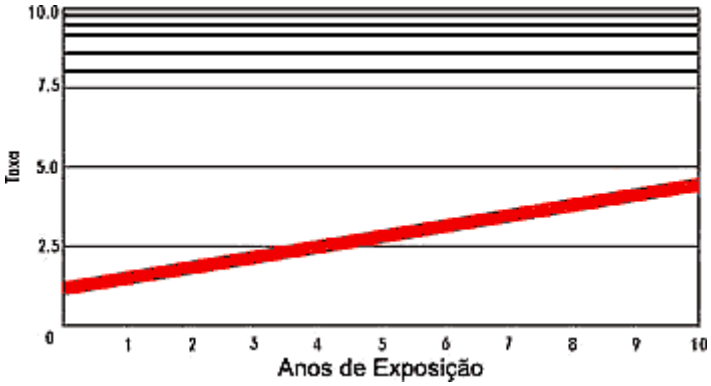


Figura 2.4 – Taxa de amarelamento em chapas de policarbonato LEXAN® XL10 da GE Plastics (Day-Brasil, 2003).

2.2.2. Avaliação da Absorção de Radiação Ultravioleta pelo Policarbonato

Em condições ambientais, os polímeros em geral são conhecidos por sofrerem degradação, um processo que resulta na deterioração de suas propriedades mecânicas, físicas e químicas. Um polímero pode degradar-se durante sua fabricação e/ou durante seu uso diário. Inúmeras são as formas nas quais as propriedades dos polímeros são afetadas pelas condições ambientais. A degradação em nível molecular pode ser causada por entidades energéticas e por entidades químicas. As entidades energéticas podem ser térmicas ou radiativas, como os raios gama, feixe de íons, elétrons ou mesmo radiação de baixo nível energético (raios UV). A energia absorvida na região ultravioleta do espectro eletromagnético produz mudanças na energia dos elétrons da molécula do polímero, resultando em transições dos elétrons de valência. O excesso de energia no estado excitado pode resultar na dissociação do polímero ou na re-emissão em forma de calor ou luz. Se a energia for re-emitida como luz e estiver na região visível do espectro, o polímero será descolorado, e este é um problema sério em materiais transparentes como o policarbonato (Ramani & Ranganathaiah, 2000; Geretovszky *et al*., 2002).

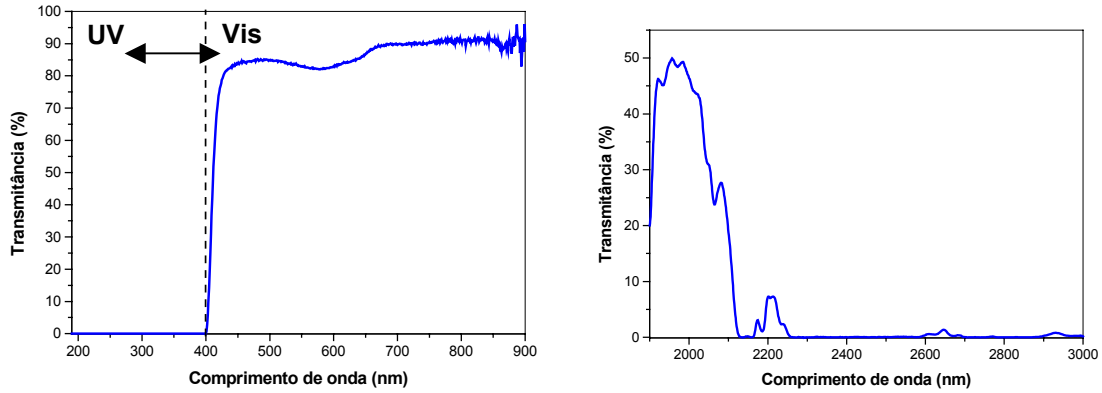
A radiação com comprimento de onda menor que 350 nm (ultravioleta) tem energia suficiente para romper as ligações entre os grupos funcionais do polímero, produzindo assim radicais livres. Estes radicais podem iniciar, mais adiante, reações como *cross-linking* (ligações cruzadas), que alteram o peso molecular do polímero (no caso de *cross-linking* há um aumento do peso molecular). A mudança no peso molecular causa alteração na viscosidade (volume livre) do material e, conseqüentemente, altera sua microestrutura (Ramani & Ranganathaiah, 2000).

Por conta da exposição do escudo polimérico à radiação ultravioleta, foram determinados os espectros de transmitância nas regiões do ultravioleta (UV), visível (Vis) e infravermelha (IV), de amostras de policarbonato incolor, tipo compacto. O objetivo desta análise foi avaliar a proteção oferecida pelo policarbonato contra a ação de radiação solar nociva, visto que as chapas adquiridas para a realização desta pesquisa possuem uma película de aditivos atuando na proteção do material contra a degradação.

Sendo assim, uma amostra de policarbonato incolor tipo compacto, 50x50x6mm³, foi submetida ao ensaio de espectrofotometria UV-Vis e IV à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C). Os espectros de absorção UV-Vis foram medidos com espectrofotômetro Perkin-Elmer Lambda 6, duplo feixe entre 190 nm e 900 nm. Os espectros de transmitância IV foram medidos no espectrofotômetro Bruker-IFS 66 na faixa 5.300-400 cm^{-1}.

A figura 2.5 apresenta os espectros de transmitância UV-Vis e IV. Comparando os resultados experimentais desta figura com os valores obtidos pelo fabricante das chapas de policarbonato (figura 2.6), observa-se que as formas dos espectros são bastante semelhantes entre si. No espectro de transmitância UV-Vis da figura 2.5, verifica-se que em toda a região do ultravioleta (abaixo de 400 nm) a camada de proteção do policarbonato absorve praticamente toda a radiação incidente (transmitância próxima de zero) e somente a partir de 400 nm (região da luz visível) a transmitância assume valores elevados (em torno de 90%).

Estes resultados permitem concluir que a camada de proteção anti-UV colocada sobre a placa de policarbonato compacto, espessura de 6 mm, protege o material contra a radiação ultravioleta, e pode oferecer a durabilidade do produto em médio/longo prazo, quando em operação nas linhas de transmissão.



(a) (b)

Figura 2.5 – Espectros de transmitância para amostra de policarbonato compacto, 6mm de espessura: (a) UV-Vis; (b) IV.

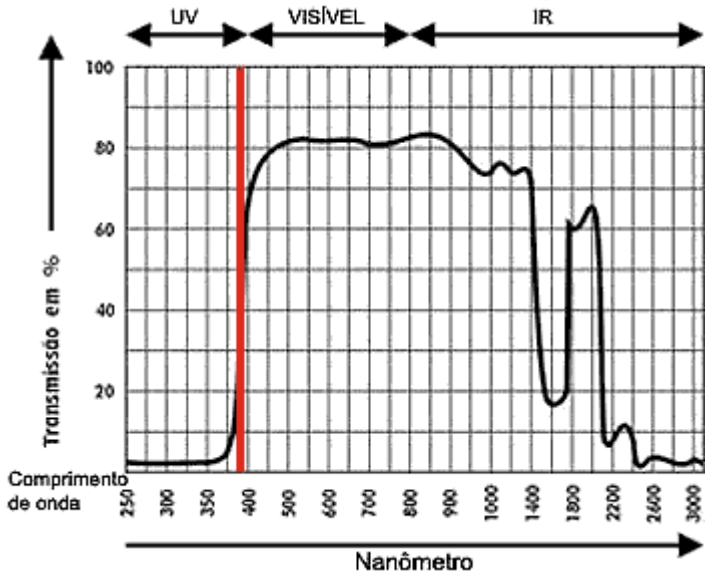


Figura 2.6 – Espectro de transmissão ultravioleta, visível e infravermelho típico para chapa de policarbonato (Day-Brasil, 2003).

Tabela 2.2 – Pontuação atribuída ao desempenho dos materiais candidatos ao escudo, em relação ao atendimento das funções do produto.

Função	Peso da função (*) (i)	Material					
		Policarbonato		Nylon 6.6		Polietileno de alta densidade	
		Nota (ii)	(i) x (ii)	Nota (iii)	(i) x (iii)	Nota (iv)	(i) x (iv)
A) Resistência ao impacto	19,64	3	58,92	1	19,64	2	39,28
B) Propriedades dielétricas	18,75	1	18,75	3	56,25	2	37,50
C) Poder extintor de fogo	11,60	3	34,8	3	34,80	1	11,60
D) Propriedades térmicas	9,82	3	29,46	2	19,64	1	9,82
E) Durabilidade e resistência a intempéries	15,18	3	45,54	1	15,18	1	15,18
F) Baixa densidade	8,93	1	8,93	2	17,86	3	26,79
G) Baixo custo	3,57	1	3,57	2	7,14	3	10,71
H) Facilidade de aquisição	2,68	1	2,68	2	5,36	3	8,04
I) Usinabilidade	4,46	3	13,38	2	8,92	2	8,92
J) Ecologicamente correto	5,37	3	16,11	3	16,11	3	16,11
K) Estética	0,00	3	0,00	2	0,00	2	0,00
Total	100	Soma:	232,14	Soma:	200,90	Soma:	183,95

(*) Corresponde à coluna de importância relativa (%) da tabela 2.1.

2.3 Ensaios de Impacto e Balístico para avaliar o Escudo de Policarbonato

2.3.1 Cálculo da Energia de Impacto para Projeto de um Equipamento de Ensaio de Impacto sob Tração

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico, representado pela medida da energia absorvida pelo material antes da fratura, sendo o impacto obtido por meio da queda de um martelete ou pêndulo (de massa conhecida), a partir de uma altura determinada, sobre a peça a ser examinada. Os ensaios normatizados (como o *Charpy* e o *Izod*) utilizam corpos de prova padronizados e de dimensão limitada e por isso não fornecem informações seguras sobre o comportamento de toda uma peça em condições de serviço; permite apenas a observação de diferenças de comportamento entre materiais (Garcia *et al*., 2000). Em conseqüência, para o desenvolvimento do escudo de policarbonato e avaliação de sua resistência ao impacto para a proteção do vidro no campo, dois tipos de ensaios foram planejados e realizados: (i) ensaio de impacto no laboratório e (ii) ensaio balístico no clube de tiros. Para a primeira abordagem, foi projetado e construído (na oficina mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE) um equipamento dedicado para realizar ensaios de impacto sob tração em isoladores de vidro utilizando um sistema pendular. Para a segunda abordagem, instrutores de tiros foram convidados a utilizar revólveres, de diferentes calibres e poder de impacto, para teste do escudo polimérico desenvolvido.

O ensaio de impacto para isoladores de vidro com escudo de policarbonato é representado na figura 2.7. Desejou-se que a energia de queda do pêndulo durante os ensaios de impacto fosse próxima à de um projétil de arma de fogo, a fim de que os resultados do experimento estivessem semelhantes às condições reais de quebra do vidro por vandalismo. Sendo assim, para o cálculo da energia de impacto de um projétil de arma de fogo, foram assumidos como hipótese os dados da tabela 2.3. A figura 2.8 representa o posicionamento de um atirador em relação a uma torre de alta tensão.

Tabela 2.3 – Hipóteses assumidas para a determinação da energia de impacto de um projétil de arma de fogo.

Distância do atirador ao pé da torre	20 m
Comprimento de um isolador de vidro	0,146 m (figura 1.3)
Comprimento de uma cadeia com 16 isoladores (16 x 0,146 m)	~ 2,5 m
Altura mínima do isolador na cadeia, em relação ao solo	20 m
Sistema conservativo (conservação da energia mecânica): Energia cinética máxima igual à Energia potencial máxima	
Massa do projétil	0,02 kg
Velocidade de impacto do projétil	250 m/s
Aceleração da gravidade	9,8 m/s²

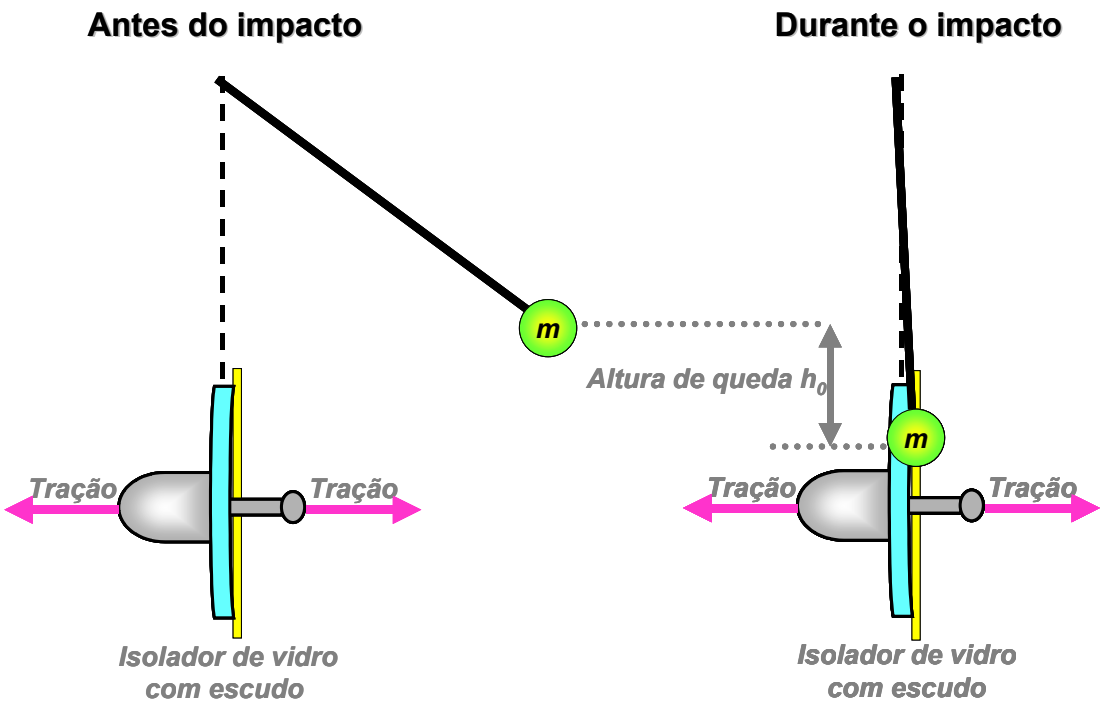


Figura 2.7 – Esboço do ensaio de impacto sob tração com pêndulo.

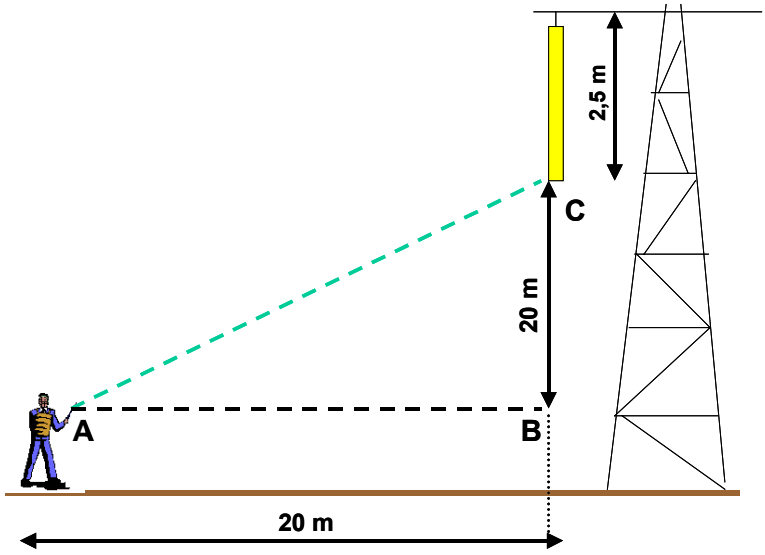


Figura 2.8 – Representação do posicionamento do atirador em relação à torre.

A energia de impacto de um projétil de arma de fogo foi então estimada pela Eq.(2.1):

$$Ecin_{pr} = \frac{m_{pr}.v_{pr}^{\ 2}}{2}$$

$$Ecin_{pr} = \frac{0{,}02.(250)^2}{2} \qquad (2.1)$$

$$Ecin_{pr} = 625J$$

onde:
m_{pr} – Massa do projétil (kg);
v_{pr} – Velocidade do projétil (m/s);
$Ecin_{pr}$ – Energia cinética de impacto do projétil (J).

Estudando a relação entre a massa e a velocidade do pêndulo necessárias à obtenção de energia cinética igual à do projétil (625 J), foi determinado o gráfico da figura 2.9, com base na Eq. (2.2):

$$Ecin_{pe} = \frac{m_{pe}.v_{pe}^{\ 2}}{2}$$
$$625 = \frac{m_{pe}.v_{pe}^{\ 2}}{2} \qquad (2.2)$$
$$\therefore m_{pe} = 1250.v_{pe}^{\ 2}$$

onde:
m_{pe} – Massa do pêndulo (kg);
v_{pe} – Velocidade do pêndulo (m/s);
$Ecin_{pe}$ – Energia cinética de impacto do pêndulo (J).

A relação entre a massa e a altura de queda do pêndulo (figura 2.10) para obter energia potencial máxima igual a 625 J, pode ser determinada pela Eq.(2.3):

$$Epot_{pe} = m_{pe}.g.h_{pe}$$
$$625 = m_{pe}.9{,}8.h_{pe} \qquad (2.3)$$
$$\therefore m_{pe} = \frac{63{,}78}{h_{pe}}$$

onde:
m_{pe} – Massa do pêndulo (kg);
g – Aceleração da gravidade (9,8 m/s²);
$Epot_{pe}$ – Energia potencial máxima do pêndulo (J).

Finalmente, pela conservação da energia mecânica, é possível obter uma relação entre velocidade e altura de queda do pêndulo (figura 2.11), dada pela Eq.(2.4):

$$Ecin_{pe} = Epot_{pe}$$
$$\frac{m_{pe}.v_{pe}^{\ 2}}{2} = m_{pe}.g.h_{pe}$$
$$v_{pe} = \sqrt{2.g.h_{pe}} \qquad (2.4)$$
$$v_{pe} = \sqrt{2.(9{,}8).h_{pe}}$$
$$v_{pe} = \sqrt{19{,}6.h_{pe}}$$

onde:
m_{pe} – Massa do pêndulo (kg);
v_{pe} – Velocidade do pêndulo (m/s);
g – Aceleração da gravidade (9,8 m/s²);
$Ecin_{pe}$ – Energia cinética máxima do pêndulo (J);
$Epot_{pe}$ – Energia potencial máxima do pêndulo (J).

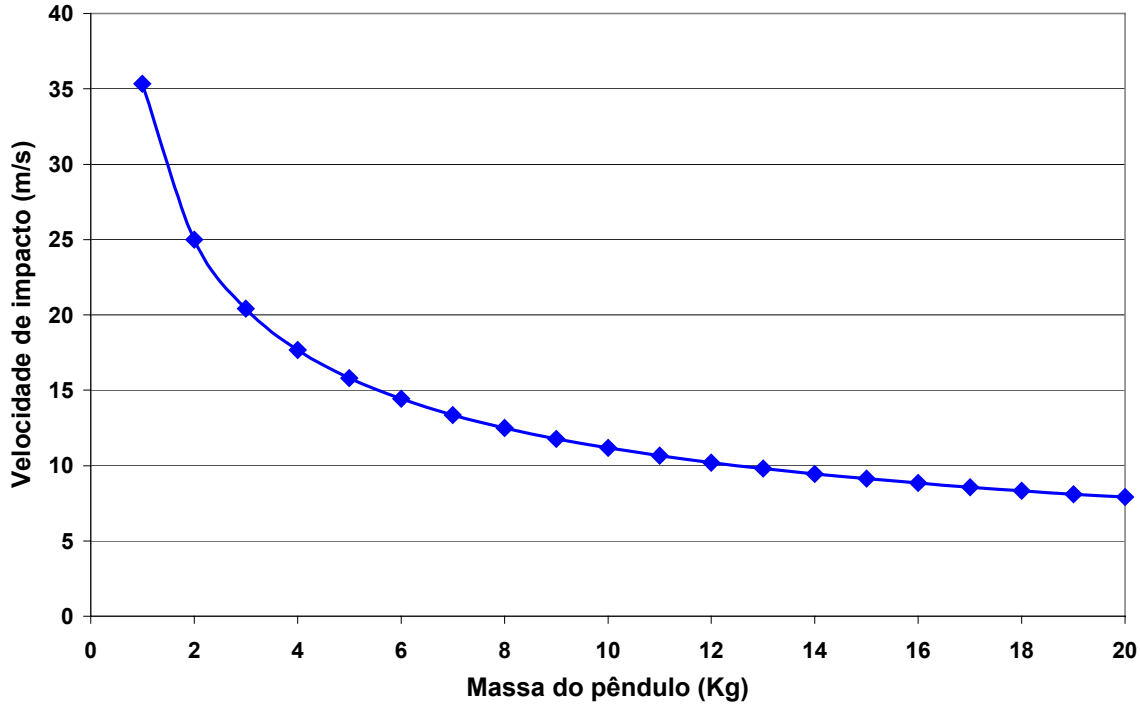


Figura 2.9 – Relação entre massa e velocidade do pêndulo (Eq.(2.2)) para obtenção de energia de impacto igual a 625 J.

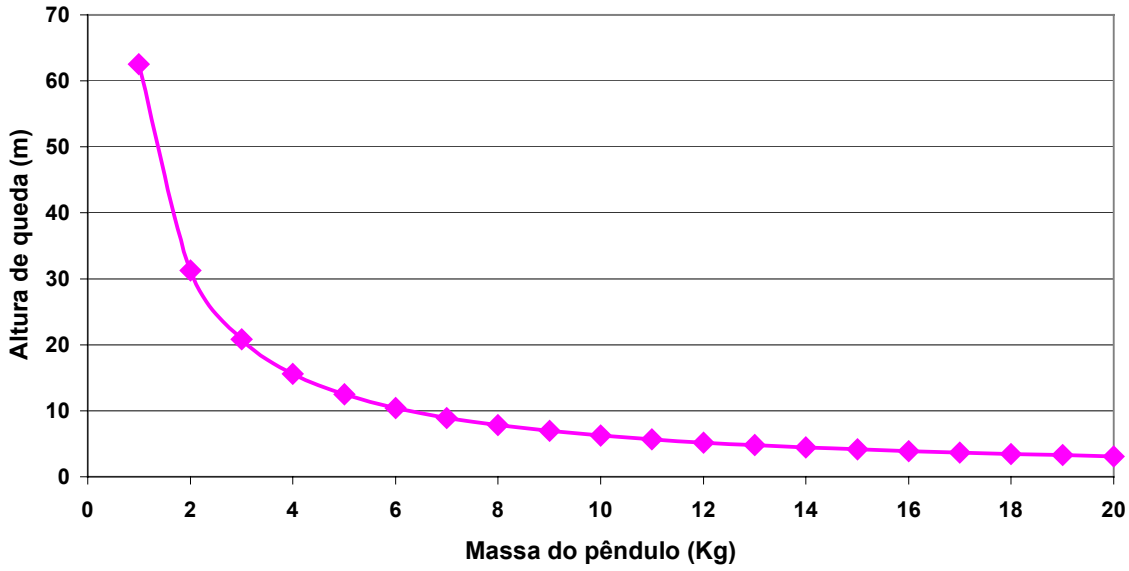


Figura 2.10 – Relação entre massa e altura de queda do pêndulo (Eq.(2.3)) para obtenção de energia de impacto igual a 625 J.

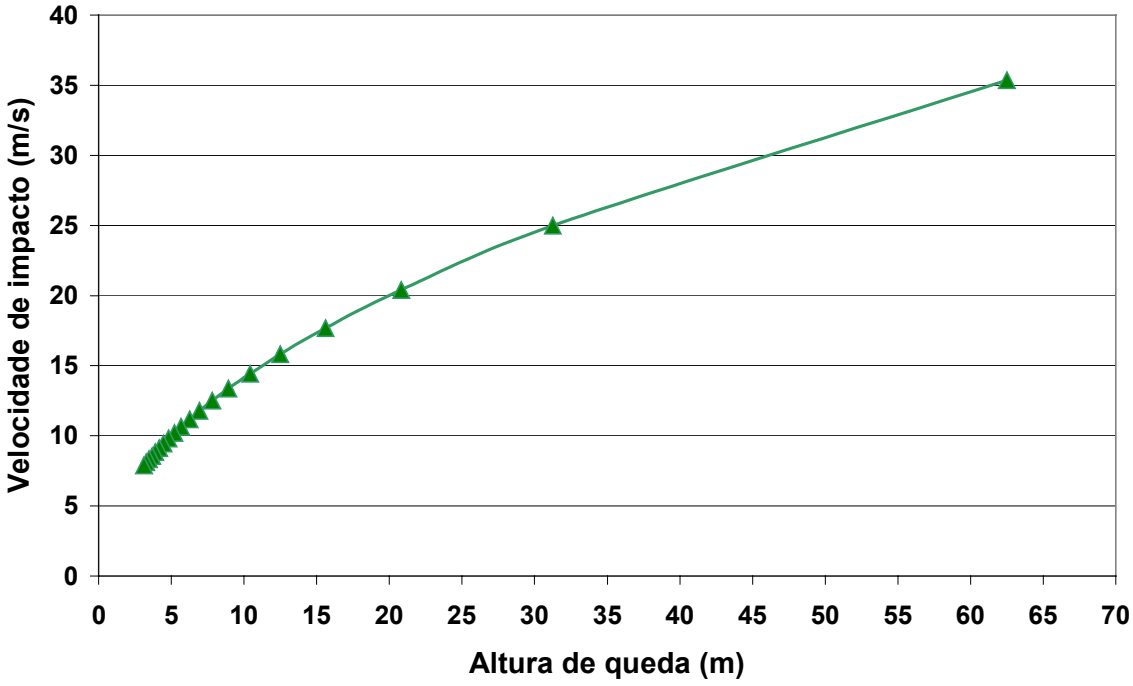


Figura 2.11 – Relação entre velocidade e altura de queda do pêndulo (Eq.(2.4)) para obtenção de energia de impacto igual a 625 J.

A altura de queda do pêndulo está relacionada, por sua vez, com o comprimento da haste do pêndulo (figura 2.12) segundo a Eq. (2.5):

$$\cos\theta = \frac{(L-h)}{L}$$
$$L - h = L \cdot \cos\theta \qquad (2.5)$$
$$h = L \cdot (1 - \cos\theta)$$

onde:
L – Comprimento da haste do pêndulo (m);
h – Altura de queda (m);
θ – Ângulo de queda, entre a haste do pêndulo e a vertical.

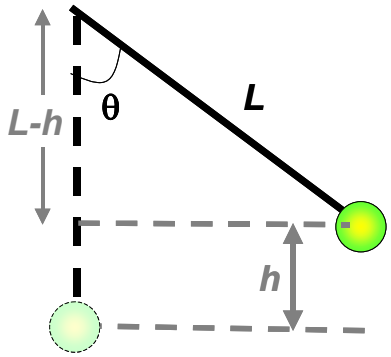


Figura 2.12: Relação entre altura de queda *h* e comprimento da haste do pêndulo.

Pelas figuras 2.9, 2.10 e 2.11, nota-se que para a obtenção de velocidade de impacto acima de 30 m/s, a massa do pêndulo deve ser inferior a 2 kg e isso implica em altura de queda superior a 60 m. Em contrapartida, observa-se que a altura máxima para a queda do pêndulo durante o ensaio corresponde ao ângulo θ igual a 180° (figura 2.12). Em outras palavras, a altura máxima que o pêndulo pode atingir corresponde, conforme a Eq.(2.5), ao dobro do comprimento da haste do pêndulo ($h_{máx} = 2.L$). Neste caso, não seria de fácil manuseio e operação, utilizar um pêndulo com haste extremamente longa; por isso, ao ser projetado o equipamento de ensaio de impacto, optou-se por trabalhar com altura máxima de queda igual a 3 m, resultando em um pêndulo com 1,5 m de comprimento. Em conseqüência, a velocidade do ensaio de impacto torna-se inferior a 10 m/s, e a massa do pêndulo deve possuir um valor em torno de 20 kg para produzir energia de impacto próxima de um projétil de arma de fogo.

2.4 Materiais e Métodos

2.4.1 Construção de um Equipamento para Ensaio de Impacto sob Tração em Isoladores de Vidro

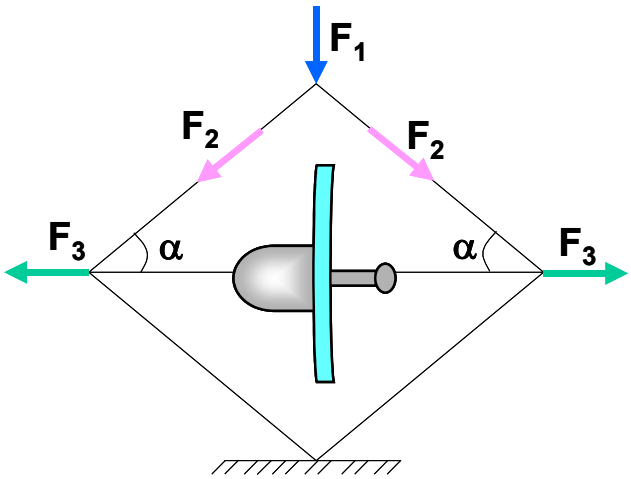
O equipamento de compressão – utilizado para a construção da máquina de ensaio de impacto sob tração – possui capacidade máxima de 30 toneladas. Para o seu funcionamento integral, dois dispositivos, apresentados a seguir, foram projetados e instalados no equipamento de compressão.

- *Dispositivo de tração* (figura 2.13): fixa o isolador de vidro na máquina e ao mesmo tempo transforma a força vertical (aplicada pela máquina de compressão) em força de tração horizontal. O dispositivo permite acoplar até dois isoladores no dispositivo de ensaio; é possível também simular os esforços mecânicos de sustentação dos cabos condutores que atuam na cadeia de isoladores, para que o ensaio de impacto seja próximo das condições reais de funcionamento do isolador.
- *Dispositivo de impacto com pêndulo* (figura 2.14): consiste de um pêndulo para fazer o impacto no isolador, devendo ser abandonado de uma altura h_0 conhecida. A ponta do pêndulo (figura 2.15) possui rosca interna para que possa ser trocada e, assim, variar o formato e a área de contato durante o impacto. A massa do pêndulo possui valor mínimo de 9 kg e pode ser aumentada com a colocação de discos metálicos no pêndulo. O dispositivo ainda permite que o impacto possa ocorrer em qualquer uma das duas faces da saia de vidro do isolador, com ângulo de incidência possível de ser variado (de 0° a 75° em relação à normal ao plano do vidro). Existem placas de policarbonato para proteger o usuário durante a utilização do dispositivo, uma vez que o vidro temperado, ao ser quebrado, estilhaça-se todo, espalhando-se em pequenos fragmentos cortantes.

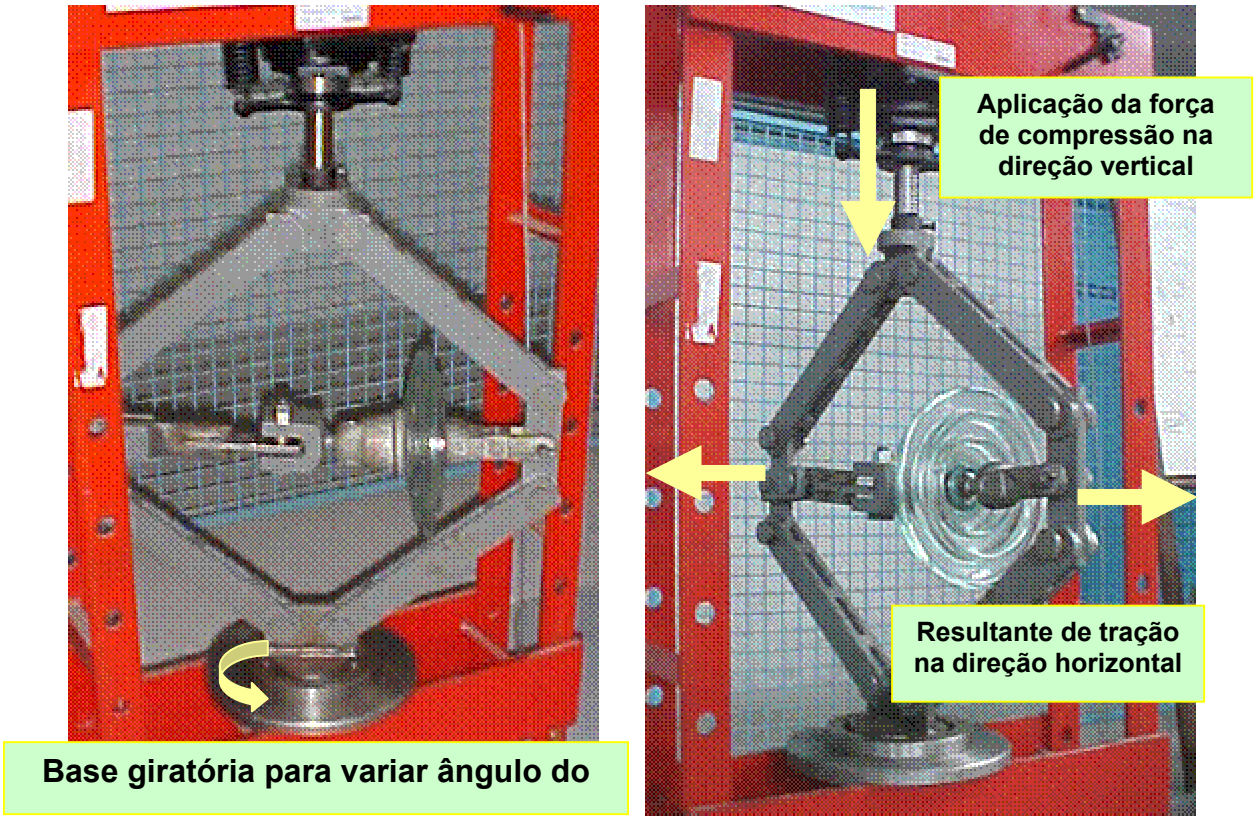
Os objetivos do experimento foram (i) simular a quebra de isoladores de vidro por impacto; (ii) avaliar qualitativamente a resistência ao impacto oferecida por chapas de policarbonato comerciais; (iii) determinar qual tipo de policarbonato disponível comercialmente e a espessura mínima necessária para oferecer proteção ao isolador de vidro. A figura 2.16 mostra o equipamento de impacto completo.

Por conta da natureza qualitativa e da limitação do ensaio de impacto com pêndulo, que não permite ensaiar uma situação real, de alta velocidade de impacto, tornou-se necessário realizar experimentos balísticos com chapas de policarbonato,

para comprovar a eficácia deste material diante de tiros disparados com armas de fogo.

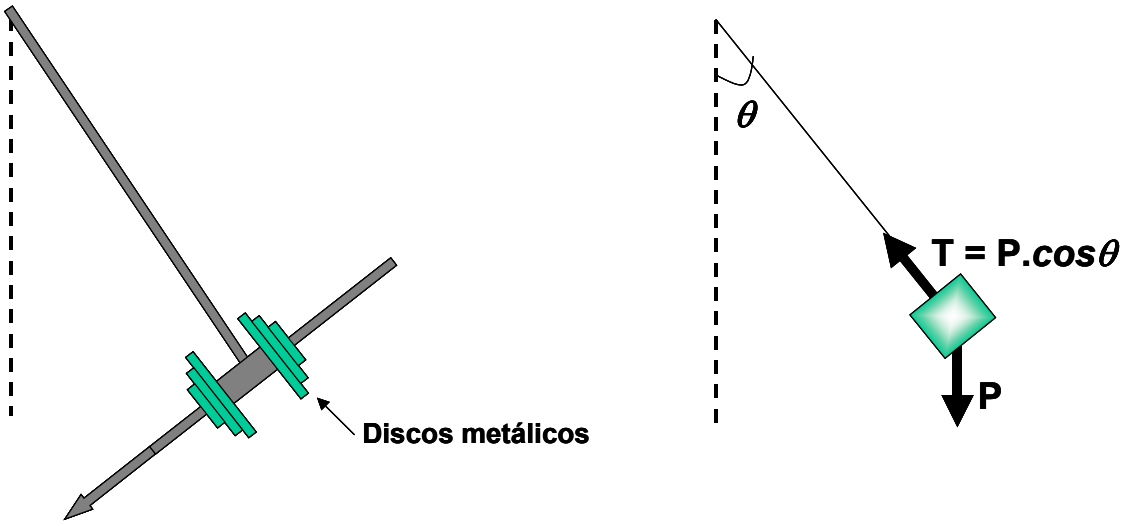


(a)



(b) (c)

Figura 2.13 – (a) Esboço das forças de tração atuando em um isolador montado no dispositivo; (b) e (c): Dispositivo de tração acoplado na máquina de compressão para dar suporte ao isolador de vidro e aplicar força de tração.



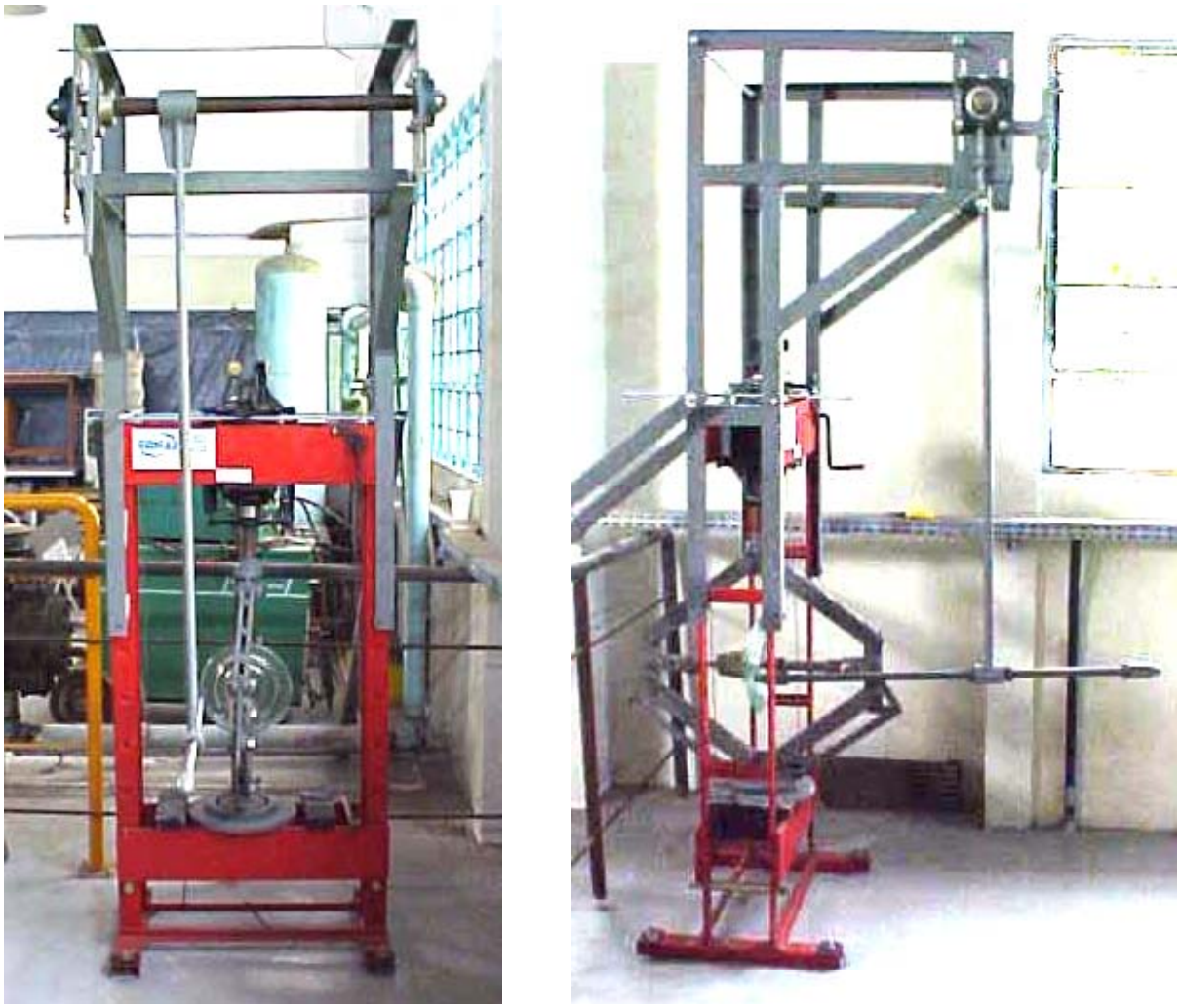
(a)

(b)

(c)

Figura 2.14 – (a) Representação das forças que atuam no pêndulo durante a queda; (b) Fotografia do dispositivo de impacto com pêndulo construído na oficina mecânica da UFPE; (c) Fotografia dos discos metálicos colocados para aumentar a massa de impacto.

Figura 2.15 – Vista ampliada do elemento de impacto (ponta do pêndulo).



(a) (b)

Figura 2.16 – Equipamento construído para realizar ensaios de impacto em isoladores de vidro, composto por máquina de compressão, dispositivo de tração e dispositivo de impacto: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

2.4.2 Avaliação da Tensão Residual no Vidro do Isolador

O vidro temperado é cerca de quatro vezes mais resistente ao impacto do que o vidro recozido; tem como característica o fato de, ao ser quebrado, sofrer um processo de "estilhaçamento", produzindo numerosos e pequenos fragmentos (Albuquerque, 1999).

Para avaliar a tensão residual existente no vidro do isolador, utilizou-se a técnica da fotoelasticimetria, baseada na propriedade que certas substâncias transparentes apresentam de agir como polaróides quando submetidas a tensões mecânicas – que em condições normais não causam

fenômenos de polarização da luz. A luz polarizada, em termos simples, corresponde às radiações eletromagnéticas no espectro visível cujos campos elétricos oscilam em um único plano. Assim sendo, um banco fotoelasticimétrico é um dispositivo de construção simples, provido de luz policromática, polaróides e máquina fotográfica. A diferença de cor no material aparece onde existem tensões mecânicas e suas diferentes tonalidades são tanto mais contrastantes entre si quanto maior a diferença nos valores de tensão mecânica na região observada (MIT- Massachusetts Institute of Techonology, 2002).

Com o auxílio de um polarizador e um analisador de luz é possível observar qualitativamente o estado de tensões residuais existente no interior do vidro de um isolador, utilizando uma fonte de luz de uma lâmpada incandescente. Neste sentido, foi montado um dispositivo para a determinação de diferentes tensões ao longo da parte vítrea do isolador (figura 2.17). O experimento consistiu em incidir luz policromática em uma das faces do vidro do isolador, adaptando no conjunto duas lentes que polarizam o feixe de luz, de modo a permitir a visualização de diferentes colorações no vidro temperado (figura 2.18).

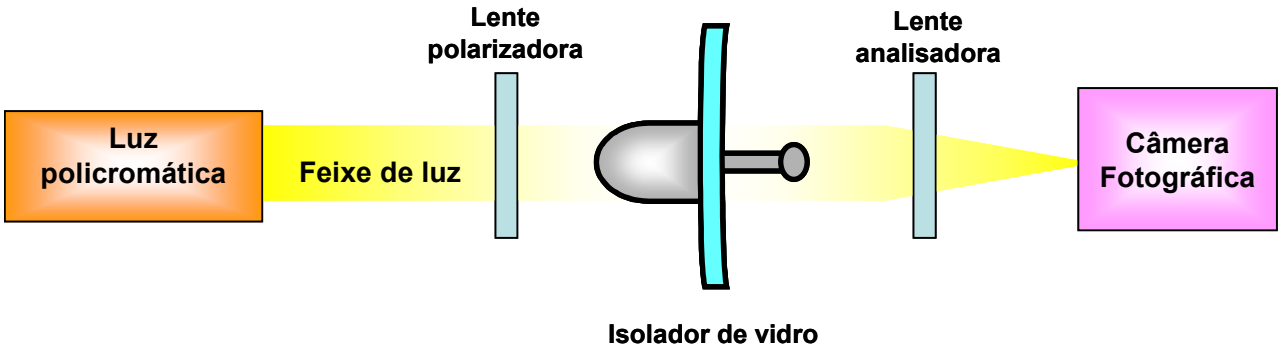
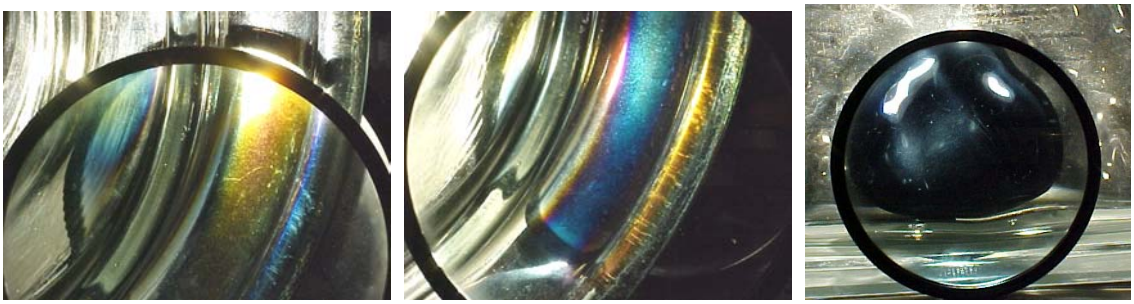


Figura 2.17 – Esquema do dispositivo montado para visualizar tensão residual no vidro do isolador.

Esse estudo qualitativo permite concluir que existem tensões diferentes ao longo do corpo de vidro, de forma que algumas regiões são mais propensas à quebra do que outras; tal fato deve ser considerado no projeto do escudo de policarbonato.

A figura 2.18 apresenta o registro fotográfico de uma parte da saia de vidro do isolador obtido no presente experimento. As fotos comprovam a existência de tensões desiguais ao longo do isolador, notadamente nas vilosidades da saia de vidro, evidenciadas pela geração de diferentes cores (azul e amarelo). À medida que o polaróide analisador é girado, a coloração vai mudando de intensidade até a obtenção de cores invertidas da situação inicial. Por outro lado, quando não há tensão residual, nota-se a ausência de coloração (figura 2.18 (c)).



(a) (b) (c)

Figura 2.18 – (a) Registro fotográfico das tensões mecânicas internas que existem no vidro do isolador; (b) Girando-se uma das lentes, ocorre inversão das cores nas zonas de tensão mecânica do vidro do isolador; (c) Ausência de tensão residual no vidro não-temperado.

2.4.3 Ensaio de Impacto com Pêndulo

Chapas incolores de policarbonato (cor cristal), sendo duas do tipo compacto (3mm e 6mm de espessura) e uma do tipo alveolar (4mm de espessura), foram cortadas em formato quadrado de lado igual a 300 mm, resultando nos escudos para proteção dos isoladores de vidro. Inicialmente, foi realizado um furo central de 35mm de diâmetro utilizando serra copo acoplado a um furadeira de bancada, para que pudesse ser encaixado no pino metálico do isolador.

Foram ensaiados 10 isoladores inteiros no equipamento de impacto, à temperatura ambiente (aproximadamente 25°C). As variáveis do experimento foram o ângulo de impacto, a espessura do escudo, a energia do impacto (em função da massa do pêndulo e da altura de queda), lado do impacto no isolador e área de contato do pêndulo. A tabela 2.4 mostra os parâmetros utilizados no ensaio. O procedimento para ensaiar a quebra do isolador de vidro com o escudo está descrito no fluxograma da figura 2.19.

Tabela 2.4 – Parâmetros do ensaio de impacto com pêndulo.

Ângulo de impacto		45°
Chapa de policarbonato		Compacto 3 mm Compacto 6 mm Alveolar 4 mm
Energia de impacto	Massa do pêndulo	21 kg
	Altura de queda do pêndulo	0,75 m a 2,50 m
Lado do impacto na saia de vidro do isolador		Parte inferior (vilosidades)[4]
Diâmetro da ponta do pêndulo		10 mm 5 mm

[4] Foi observado nos ensaios preliminares de impacto, que a parte inferior da saia de vidro, próximo à borda, é a região mais sensível quando sofre impacto do pêndulo.

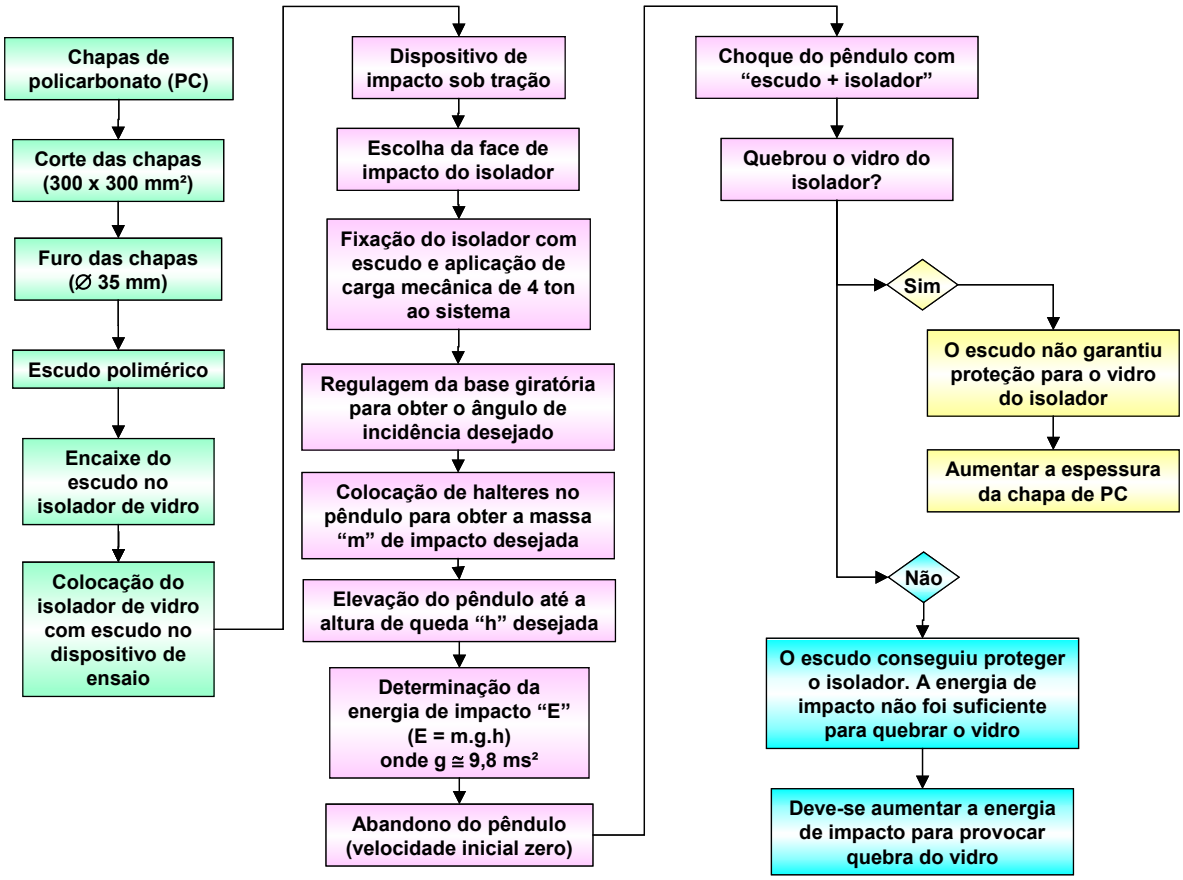


Figura 2.19 – Fluxograma do método de ensaio do escudo polimérico no dispositivo de impacto sob tração com pêndulo.

2.4.4 Ensaio Balístico

O ensaio balístico foi realizado no clube de tiros do *Caxangá Golf Club*, Recife. Foi construída uma base metálica para sustentar horizontalmente até 5 isoladores de vidro em cadeia, a fim de que o projétil percorresse trajetória retilínea e horizontal (garantindo maior segurança durante o ensaio). Neste ensaio, foram utilizados apenas escudos de policarbonato compacto, de 6 mm de espessura, por serem os que apresentaram melhor *performance* durante os ensaios de impacto com pêndulo.

A distância do atirador ao alvo (isoladores) foi mantida constante – aproximadamente 15 metros. As armas utilizadas foram revólver calibre 22, revólver calibre 38, Glock calibre 38, Glock calibre 45 e Magnum calibre 44. O experimento foi conduzido de forma que os disparos eram feitos sempre contra o primeiro escudo de policarbonato (que protege o primeiro isolador). Entre um disparo e outro eram observados (i) o tipo de munição utilizado no disparo; (ii) o grau de perfuração causado no escudo; (iii) o resultado sobre o isolador, com respeito à integridade do vidro. Após a quebra do primeiro isolador, prosseguiu-se o ensaio até que houvesse a quebra do segundo isolador, e assim sucessivamente, até que fossem quebrados os cinco isoladores da cadeia, ou até que se chegasse ao limite de quebra atingido pela melhor munição.

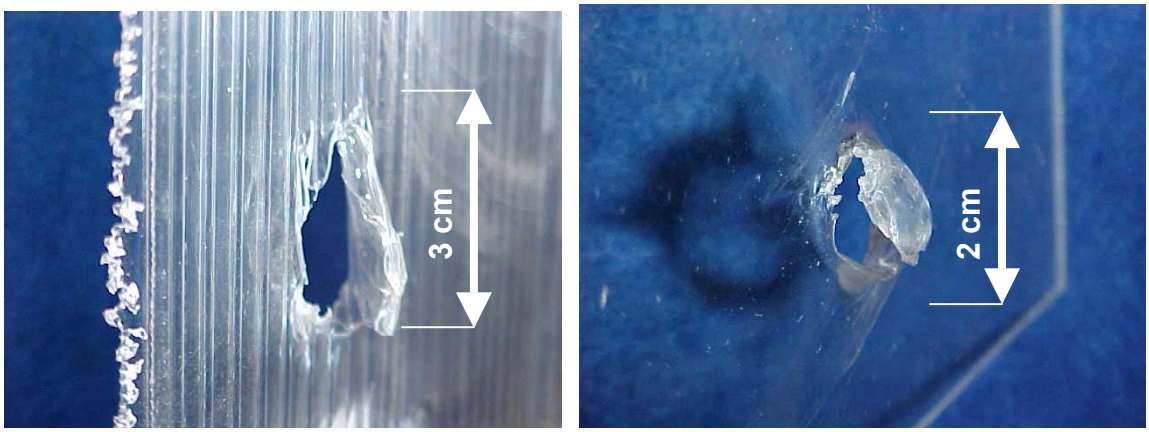
2.5 Resultados e Discussão

Nas figuras 2.20 e 2.21, assim como na tabela 2.5, são apresentados os resultados do ensaio de impacto com pêndulo. Os valores de energia de impacto da tabela 2.5 foram calculados pela Eq. (2.3), que correlaciona a massa e a altura de queda do pêndulo.

Tabela 2.5 – Resultados obtidos no ensaio de impacto sob tração com pêndulo.

Diâmetro da ponta do pêndulo (mm)	Escudo	Massa (Kg)	Altura de queda (m)	Energia de impacto (*) requerida para quebrar o vidro (J)
10	Nenhum	21,00	1,00	205,80
	PC alveolar 4 mm	21,00	1,50	308,70
	PC compacto 3 mm	21,00	1,80	370,44
	PC compacto 6 mm	21,00	2,50	514,50
5	Nenhum	21,00	0,75	154,35
	PC alveolar 4 mm	21,00	1,00	205,80
	PC compacto 3 mm	21,00	1,20	246,96
	PC compacto 6 mm	21,00	2,00	411,60

(*) Valor de energia de impacto suficiente para quebrar o vidro do isolador, considerando g = 9,8 m/s².



(a) (b)

Figura 2.20 – Detalhe da perfuração das placas de policarbonato (a) Alveolar de espessura igual a 4 mm; (b) Compacto de espessura igual a 6mm.

(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 2.21 – Alguns resultados do ensaio de impacto sob tração com pêndulo: (a) Colocação do isolador no equipamento (b) Impacto do pêndulo (c) Quebra do isolador de vidro sem escudo de proteção; (d) Isolador com escudo de policarbonato; (e) Detalhe da perfuração da chapa de policarbonato alveolar (4mm) após o ensaio de impacto; (f) Impacto do pêndulo em isolador de vidro com escudo de policarbonato compacto.

Observa-se na tabela 2.5 que valores mais elevados de energia de impacto indicam maior resistência ao impacto oferecida pelo escudo polimérico. De todos os escudos ensaiados, o de policarbonato alveolar (4mm) oferece a menor resistência ao impacto (205,80 J, diâmetro do elemento de impacto igual a 10 mm), enquanto que o escudo de policarbonato compacto de 6 mm apresentou excelentes resultados (514,50 J, diâmetro do elemento de impacto igual a 10 mm). Nota-se também que quando se utiliza menor diâmetro da ponta de impacto, aumenta-se a pressão de contato do pêndulo com o vidro; isto diminui o valor de resistência ao impacto do escudo.

A figura 2.22 apresenta alguns projéteis lançados contra o escudo. Os resultados do ensaio balístico são mostrados nas figuras 2.23, 2.24, e 2.25.

Figura 2.22 – Fotografias de alguns projéteis lançados contra o escudo de policarbonato.

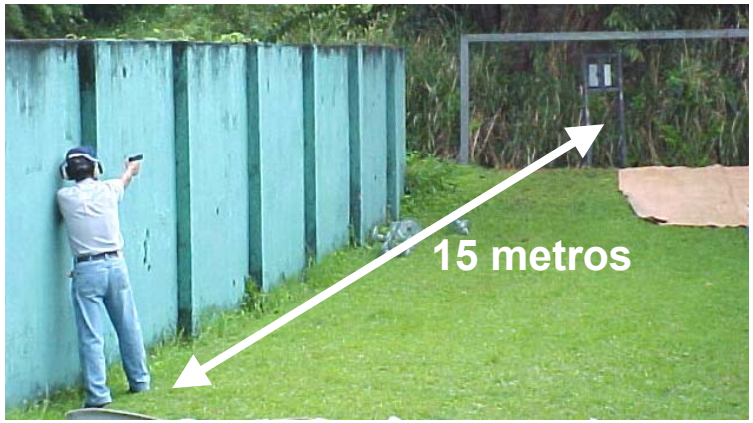
Escudo	**Arma**	**Resultado**									
		1° PC	1° IS	2° PC	2° IS	3° PC	3° IS	4° PC	4° IS	5° PC	5° IS
Nenhum	Revólver calibre 38, carga dupla+P, ponta oca.		Q								
PC compacto 6mm	Revólver calibre 38, carga dupla, ponta ogival.	P									
	Revólver calibre 38, carga dupla+P, ponta oca.	P									
	Glock, calibre 38, *rolo point* (ponta oca).	P									
	Revólver calibre 22	P									
	Glock calibre 38	P	Q								
	Glock calibre 45	P	---	P	Q						
	Glock calibre 45	P	---	P	---	P					
	Revólver calibre 44 magnum	P	---	P	---	P					
	Revólver calibre 44 magnum	P	---	P	---	P					

Legenda:

- P — **Escudo perfurado;**
- Q — **Saia de vidro quebrada;**
- **Ausência de escudo;**
- --- — **Ausência da saia de vidro, por conta de sua quebra no disparo anterior;**
- **Nenhuma alteração na integridade**.

Figura 2.23 – Resultados do ensaio balístico.

(a)



(b)

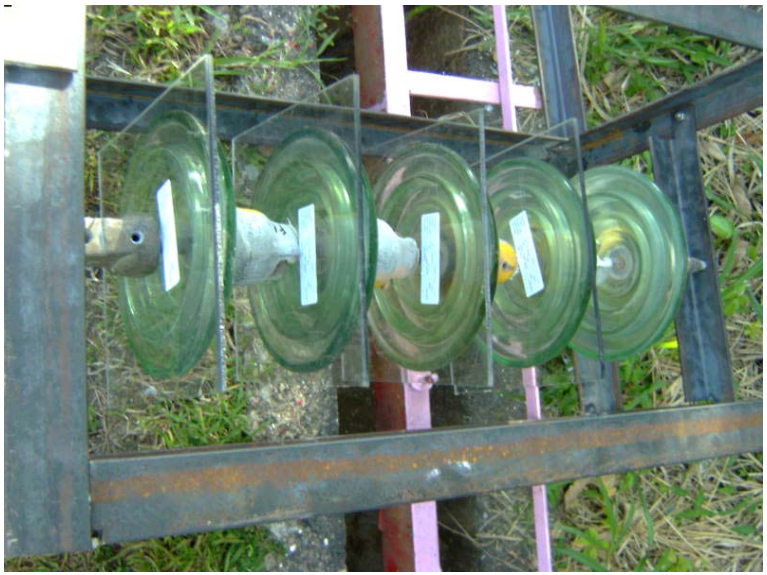
(c)

(d)

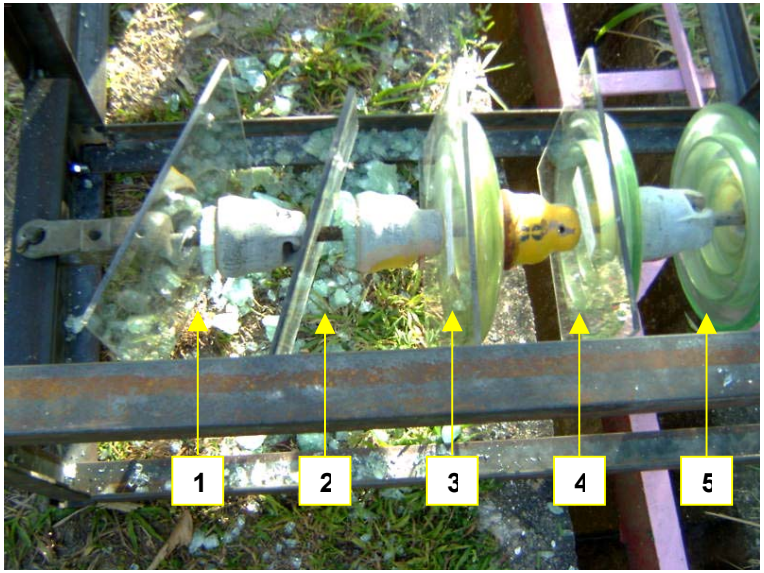
(e)

(f)

Figura 2.24 – Alguns resultados do ensaio balístico: (a) Glock calibre 38 e revólver cano longo calibre 38; (b) Atirador posicionado diante do alvo; (c) Configuração do experimento para 2 isoladores de vidro inteiros; (d) e (e) Perfuração do escudo e manutenção da integridade da saia de vidro; (f) Projétil alojado no escudo e manutenção da integridade da saia de vidro.



(b)



(c)

(d)

Figura 2.25 – Alguns resultados do ensaio balístico: (a) Configuração da cadeia com 5 isoladores inteiros; (b) Quebra do 1° isolador; (c) Quebra do 1° e 2° isoladores; (d) Detalhe da perfuração dos escudos e integridade do 3° isolador.

Analisando os resultados da figura 2.24, observa-se que o escudo de policarbonato compacto na espessura de 6 mm apresentou desempenho satisfatório na resistência aos disparos com munições diversas. O material conseguiu impedir a quebra de isoladores quando foi utilizado revólver calibre 38. Fazendo disparos com arma mais potente, como a Glock, ocorreu a quebra do primeiro isolador. O escudo de policarbonato, ao ser colocado em contato direto com o vidro, permitiu a transferência de boa parte da energia do projétil para o vidro. Em contrapartida, quando não há contato direto do policarbonato com o vidro (quando a saia de vidro está quebrada), o escudo possui liberdade de movimento para recuar e absorver melhor a energia do projétil. Dessa forma, o policarbonato desempenha de maneira otimizada a função de 'escudo', e menos energia de impacto é transferida à saia de vidro. Fazendo uso de arma mais potente, como a Magnum calibre 44 (equivalente a um rifle), verificou-se que o projétil conseguiu atravessar somente três escudos poliméricos e quebrou o terceiro isolador.

2.6 Conclusões

Os resultados dos ensaios de impacto com pêndulo são de natureza quantitativa. No entanto, resultados com ensaios balísticos são de fundamental importância para avaliação final do ponto de vista de resistência mecânica do escudo de policarbonato, uma vez que as dimensões dos projéteis ensaiados se aproximam dos dispositivos utilizados nos atos de vandalismo no campo. As seguintes conclusões podem ser extraídas do presente capítulo:

- Das chapas de policarbonato compacto ensaiadas com equipamento de impacto, a de 6 mm apresentou-se mais adequada na confecção do escudo do que composições de chapas mais finas feitas de chapa alveolar;
- Observações com a luz polarizada permitiram avaliar qualitativamente a distribuição de tensão residual no vidro temperado do isolador. Ensaios de impacto no laboratório mostram que existe uma certa correlação deste experimento com a observação da luz polarizada, pois há variação no valor da energia de impacto para a quebra do isolador em função da região que o pêndulo atinge o vidro, indicando assim, que existem regiões relativamente mais frágeis no material.
- Os valores de energia de impacto para o policarbonato tipo alveolar foram muito baixos e demonstram que este tipo de chapa não deve ser utilizada na confecção do escudo. A espessura de 3 mm para o policarbonato tipo compacto é insuficiente para garantir boa proteção do vidro do isolador, apesar de seu desempenho ser superior ao policarbonato alveolar.

O escudo de policarbonato compacto com chapa de 6 mm de espessura, apresentou excelente desempenho na proteção do vidro dos isoladores ensaiados com revolveres de diferentes calibres e impacto. Numa cadeia de cinco isoladores foi possível quebrar somente três unidades, mesmo utilizando a arma Magnum, calibre 44. Em outras palavras, o alcance máximo do projétil foi perfurar três escudos de policarbonato e quebrar o terceiro isolador. Os escudos, em conjunto, ofereceram proteção contra os tiros – a energia do projétil foi diminuída ao atravessar os escudos de cada isolador de forma que, no terceiro escudo, a energia não foi mais suficiente para quebrar o quarto isolador.

Por conta dos resultados obtidos no ensaio balístico, é desejável que o escudo, ao ser encaixado no pino metálico do isolador de vidro, tenha espaço suficiente para

movimentar-se ao longo do pino, sem ficar apoiado na saia de vidro, a fim de que o mesmo possa absorver melhor a energia de impacto do projétil. Sendo assim, sugere-se que o escudo de policarbonato seja colocado na campânula do isolador.

Pode-se ainda utilizar escudo de policarbonato com espessura maior que 6mm para reforçar a proteção contra projéteis. Porém, a chapa mais espessa tem maior custo, e os resultados obtidos neste ensaio balístico indicam que a espessura de 6 mm já apresenta excelente desempenho diante de munições calibre 22 e 38 – mais utilizadas em atos de vandalismo.

3. ENSAIOS DE ALTA TENSÃO COM ESCUDO DE POLICARBONATO E DETERMINAÇÃO DE SEU VALOR ECONÔMICO

3.1 Ensaios do Escudo de Policarbonato com Alta-Tensão

Para avaliar a influência da tensão de disrupção sobre os escudos de policarbonato colocados numa cadeia de isoladores, e vice-versa, ensaios com alta-tensão foram realizados utilizando freqüência industrial e impulso de manobra com polaridades positiva e negativa. A seguir, os resultados dos ensaios são apresentados e discutidos.

3.1.1 Considerações sobre a Distribuição de Tensão em Cadeia de Isoladores de Vidro

Uma linha de 230 kV é composta de dezesseis (16) isoladores de vidro. Em condições particulares de temperatura e umidade, adota-se o número sete (7) como quantidade mínima de unidades inteiras necessárias à segurança e manutenção da linha energizada.

Quando todos os isoladores de vidro de uma cadeia de 230 kV estão inteiros, a distribuição de tensões em cada unidade não é uniforme (Pavlik, 1989; Simões, 2003), como mostra a figura 3.1. Os isoladores próximos às extremidades da cadeia (ou seja, os primeiros e os últimos) estão sujeitos a tensões mais elevadas que os isoladores localizados na região central.

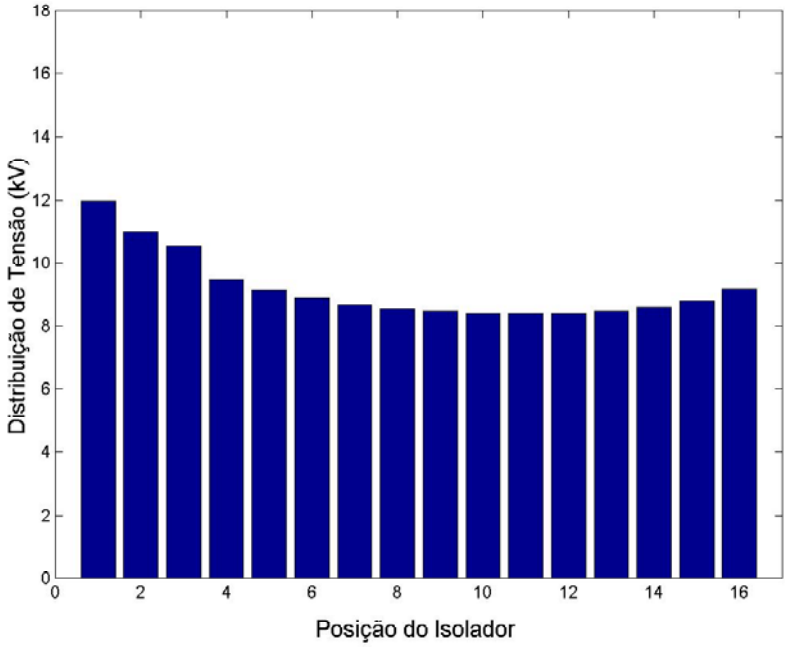


Figura 3.1 – Gráfico de simulação da distribuição de tensão ao longo da cadeia de 16 isoladores para linha de 230kV (Simões, 2003).

Com o propósito de se avaliar o desempenho dos escudos de policarbonato instalados numa cadeia de 16 isoladores de vidro (para linha de 230 kV) foram conduzidos ensaios de alta-tensão comparativos, para determinar os valores de tensão disruptiva da cadeia de isoladores, sem e com os escudos dispostos em diferentes posições.

3.2 Materiais e Métodos

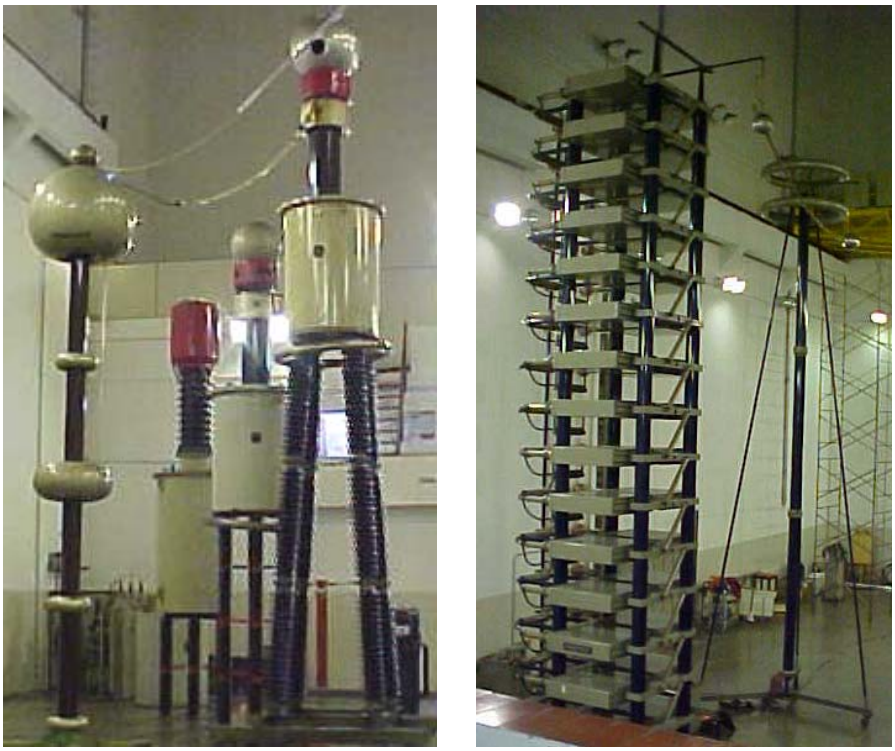
Os ensaios de alta-tensão foram realizados no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE- USP), com capacidade para realizar ensaios de impulsos de tensão até 1300 kV e tensão de freqüência industrial (60 Hz) até 800 kV. No experimento de alta-tensão, foram determinados os valores de tensão disruptiva.

- em freqüência industrial (média de 5 medições), correspondendo à condição normal de funcionamento da linha de alta-tensão; foram utilizados transformadores da *Toshiba* e *GE* em cascata (figura 3.2 (a))
- com impulso de manobra com polaridades negativa e positiva (média de 20 medições para cada tipo), simulando o surto de tensão na linha de alta-tensão; utilizou-se o equipamento Haefely (figura 3.2 (b)).

O experimento foi conduzido segundo a norma NBR 6936 (Técnicas de Ensaios Elétricos de Alta-Tensão, Abril/1992). Para impulso de manobra positiva, a forma de onda utilizada, em cumprimento à norma, está representada na figura 3.3, onde a variável T_p (duração da crista de um impulso de corrente tipo retangular) corresponde ao intervalo de tempo durante o qual a corrente elétrica é superior a 90% do valor de crista, aproximadamente igual a 278 μs (NBR 6936). O valor do T_p pode variar de 200 μs a 300 μs, segundo a norma.

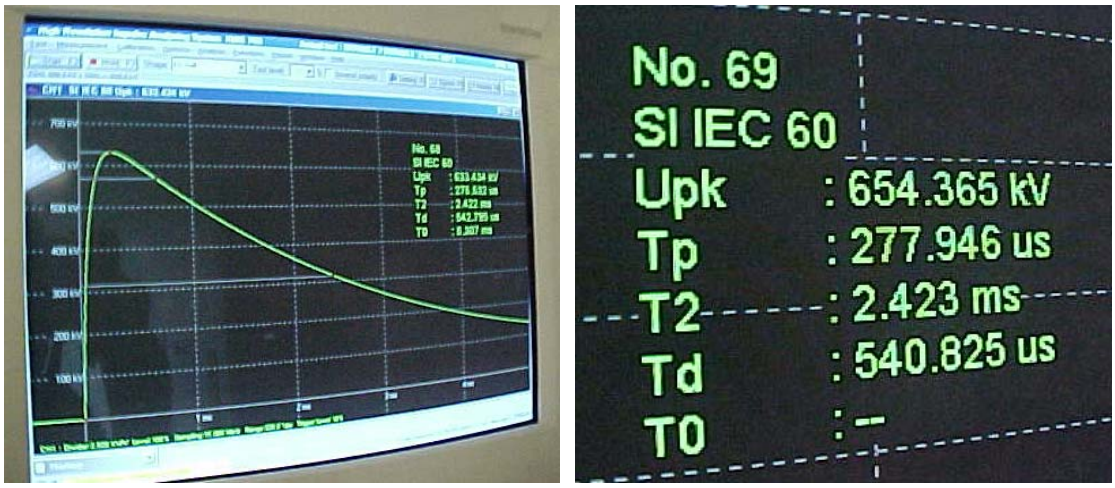
Foram utilizados 16 isoladores de vidro em cadeia, dos quais eram 7 inteiros contra 9 quebrados. A posição dos 7 isoladores inteiros foi variada ao longo do ensaio, segundo 5 configurações diferentes, das quais as de número 1 e 4 são repetidas para isoladores com os escudos de policarbonato (figuras 3.4 e 3.5). Os ensaios foram feitos à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C), pressão de 703 mmHg e umidade próxima de 70%. Os valores de tensão obtidos experimentalmente são corrigidos para os valores de referência, de acordo com norma NBR 6936 de 1992, devido às diferentes condições atmosféricas.

Dez (10) escudos de policarbonato compacto, espessura de 6mm, foram cortados na forma quadrada de 300 mm de lado, com furo central de 63 mm $\pm$ 1 mm. Em todas as configurações, os escudos foram encaixados nas campânulas dos isoladores mais superiores (ou seja, os dez últimos). Observou-se que cada escudo ficou em contato com a saia de vidro do isolador seguinte (superior) como pode ser visto pela figura 3.6.



(a) (b)

Figura 3.2 – Fotografias dos equipamentos utilizados no ensaio de tensão disruptiva: (a) Em freqüência industrial, 60Hz (Toshiba e GE); (b) Impulso de manobra com polaridade positiva e negativa (Haefely).



(a) (b)

Figura 3.3 – (a) Forma de onda obtida gerada (circuito Marx) para impulso de manobra com polaridade positiva; (b) Valor de Tp, em μs.

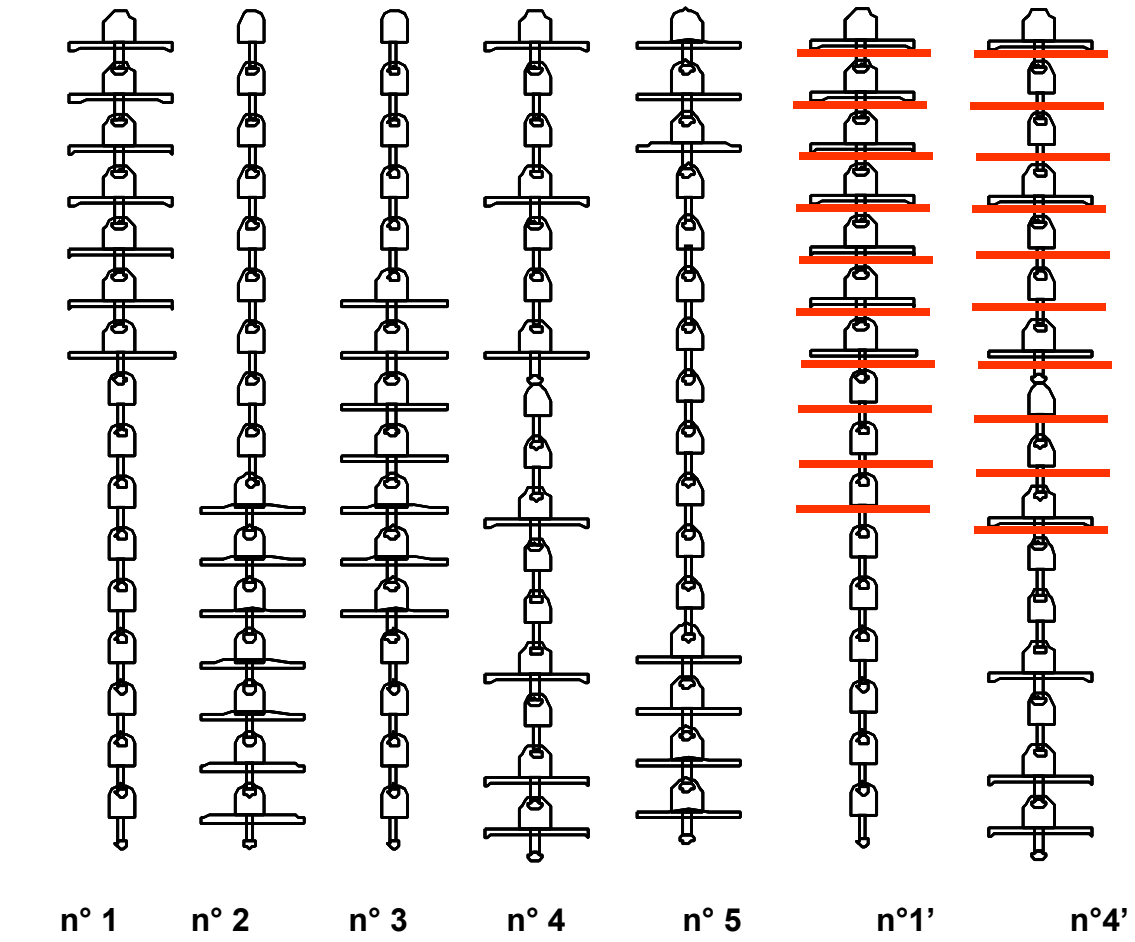
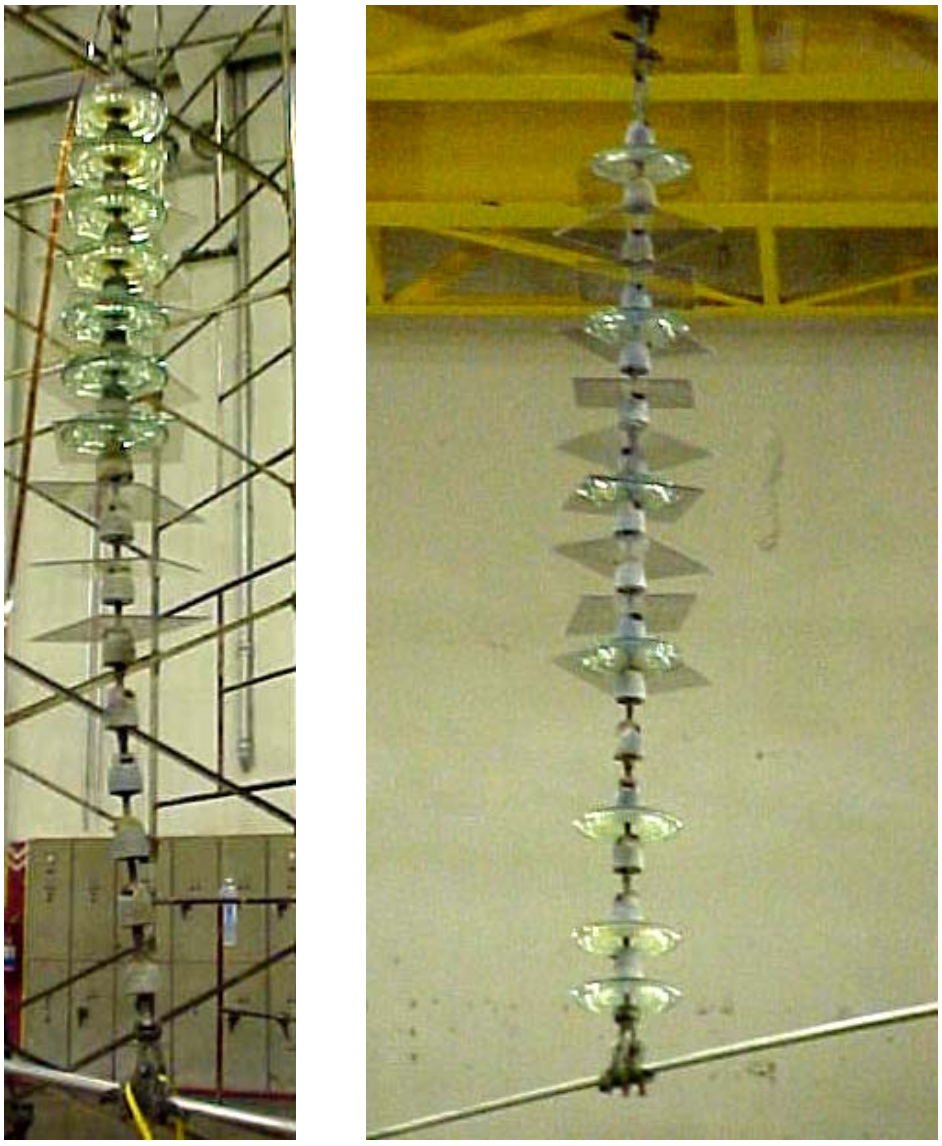


Figura 3.4 – Esboço das configurações utilizadas no ensaio de tensão disruptiva com cadeia de 16 isoladores de vidro, sendo 7 inteiros e 9 quebrados.

n°1 **n°2** **n°3** **n°4** **n°5**

(a)

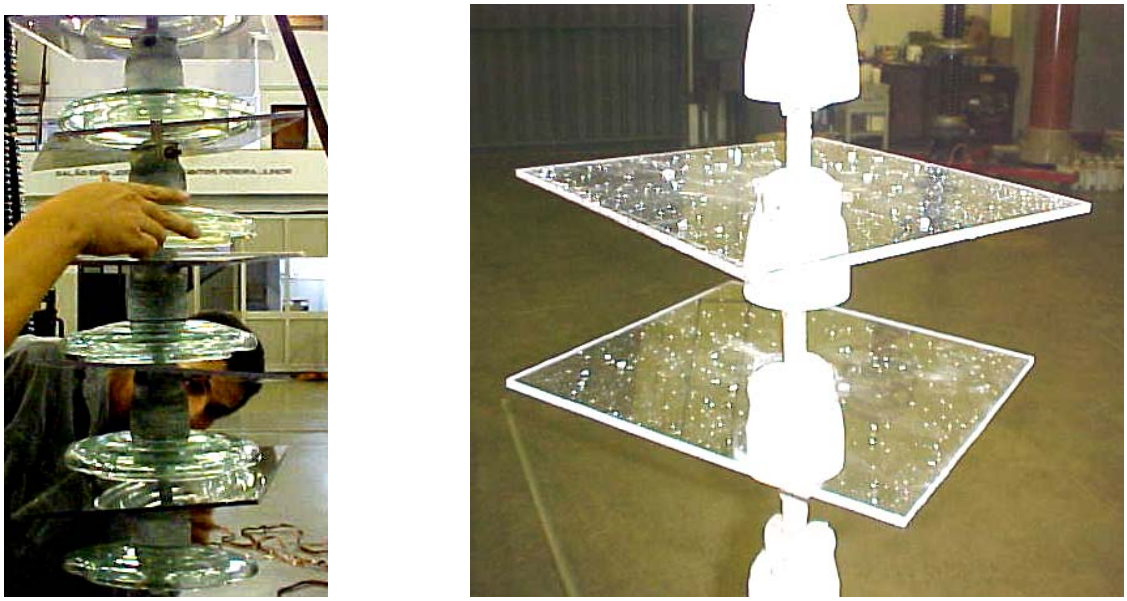
Figura 3.5 – (a) Fotografias das configurações utilizadas no ensaio de tensão disruptiva com cadeia de 16 isoladores de vidro, sendo 7 inteiros e 9 quebrados, sem escudo de policarbonato.



n°1’ **n°4’**

(b)

Figura 3.6 – (b) Fotografias das configurações utilizadas no ensaio de tensão disruptiva com cadeia de 16 isoladores de vidro, sendo 7 inteiros e 9 quebrados, com escudo de policarbonato.



(a) (b)

Figura 3.7 – (a) Fotografia sobre detalhes de colocação de escudos de policarbonato na cadeia de isoladores de vidro; (b) Posicionamento do escudo de policarbonato na campânula do isolador de vidro.

3.3 Resultados e Discussão

A tabela 3.1 e a figura 3.8 mostram os resultados do experimento. A figura 3.9 retrata o momento da descarga elétrica na cadeia de isoladores com escudo de policarbonato. A figura 3.10 apresenta os escudos de policarbonato após os ensaios.

Tabela 3.1 – Resultados do ensaio de tensão disruptiva em cadeia de isoladores com e sem escudo de policarbonato.

SEM ESCUDO DE POLICARBONATO			
Configuração	Tensão disruptiva freq. industrial (kV)	Tensão disruptiva impulso manobra polaridade positiva (kV)	Tensão disruptiva impulso manobra polaridade negativa (kV)
1	448,0	584,0	741,0
2	454,7	623,4	732,4
3	478,0	588,0	766,0
4	505,0	661,0	894,0
5	496,0	NR	NR
COM ESCUDO DE POLICARBONATO			
Configuração	Tensão disruptiva freq. industrial (kV)	Tensão disruptiva impulso manobra polaridade positiva (kV)	Tensão disruptiva impulso manobra polaridade negativa (kV)
1	477,0	614,0	733,0
2	NR	NR	NR
3	NR	NR	NR
4	500,0	704,0	876,0
5	NR	NR	NR

NR: Não Realizado.

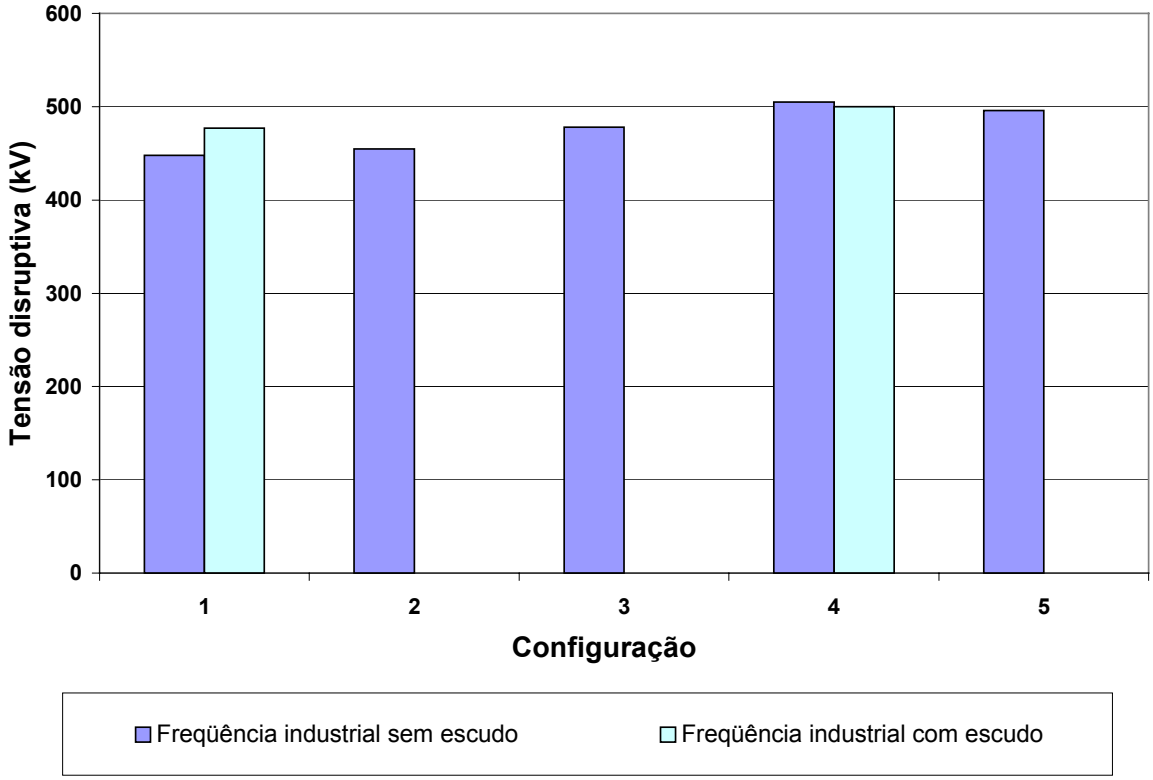


Figura 3.8 – (a) Valores de tensão disruptiva em freqüência industrial para as configurações do experimento.

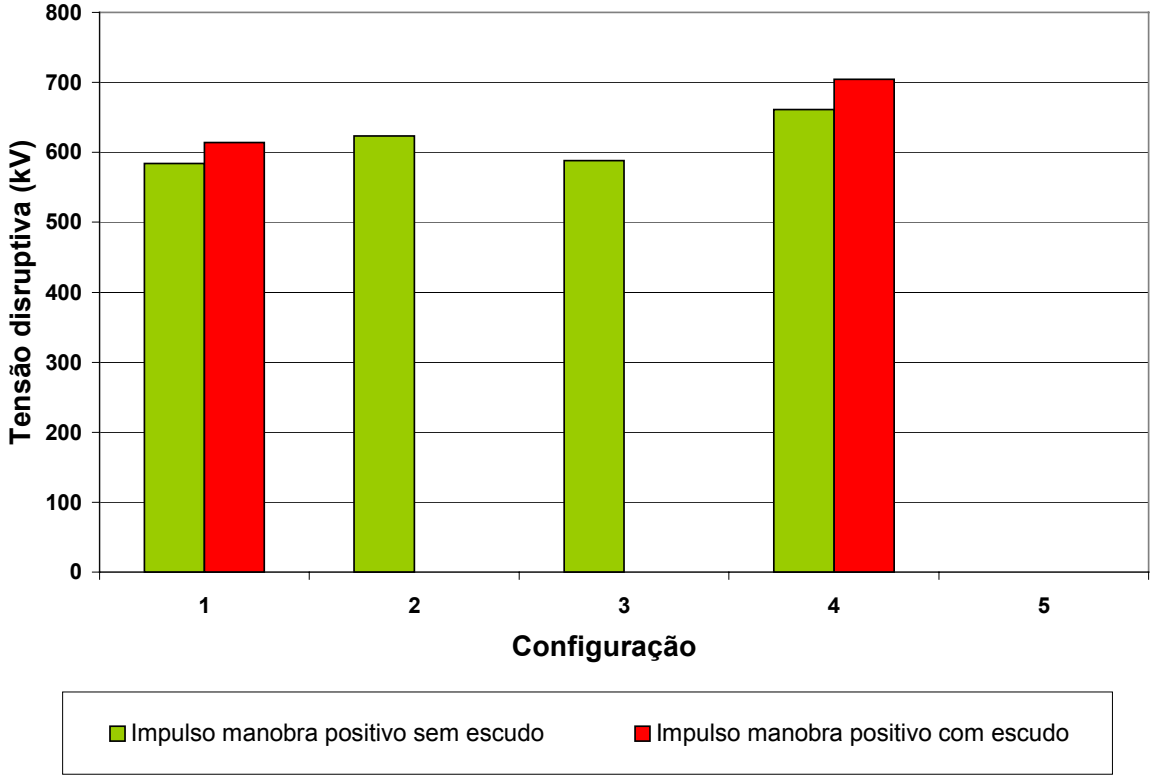


Figura 3.8 – (b) Valores de tensão disruptiva em impulso de manobra com polaridade positiva para as configurações do experimento.

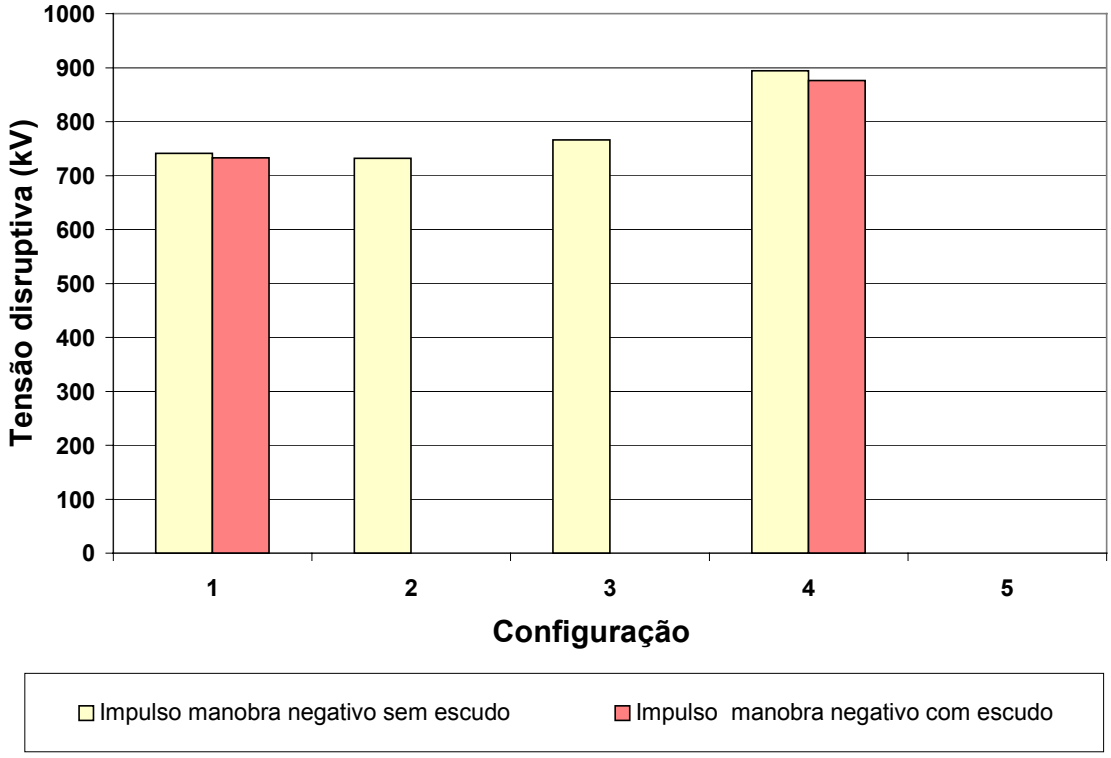
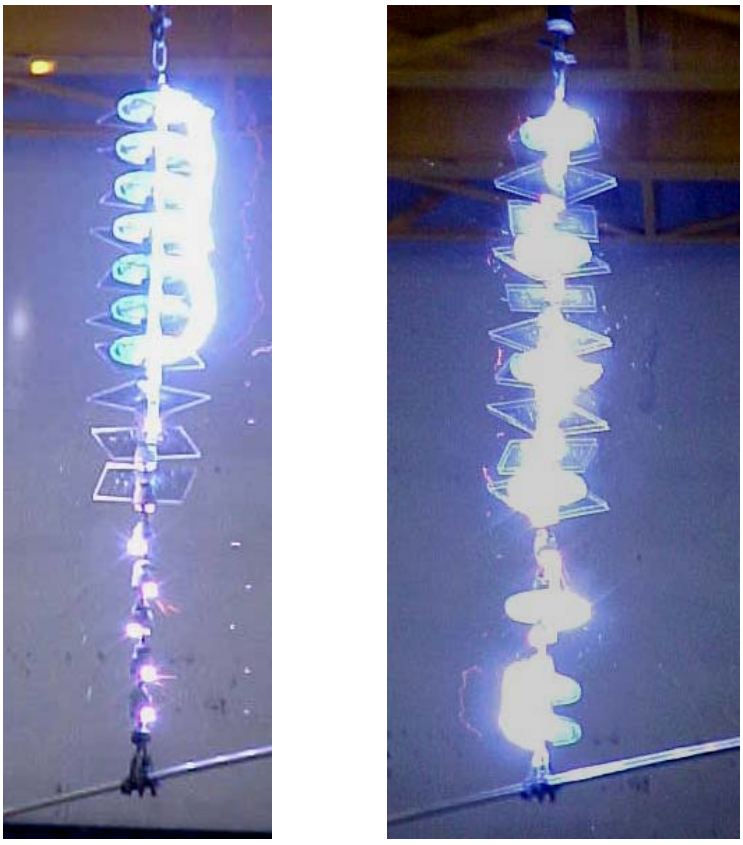


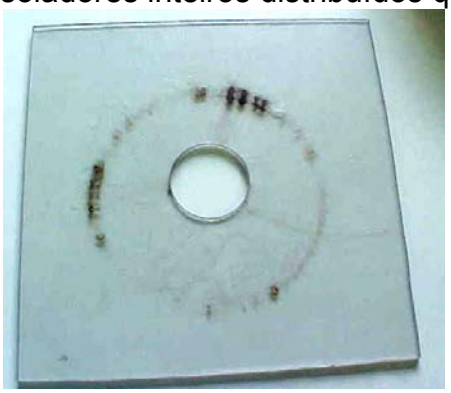
Figura 3.8 – (c) Valores de tensão disruptiva em impulso de manobra com polaridade negativa para as configurações do experimento.



(a) (b)

Figura 3.9 – Ocorrência de descarga elétrica em cadeia de 16 isoladores de vidro com escudo polimérico, sob freqüência industrial: (a) Configuração de número 1 (7

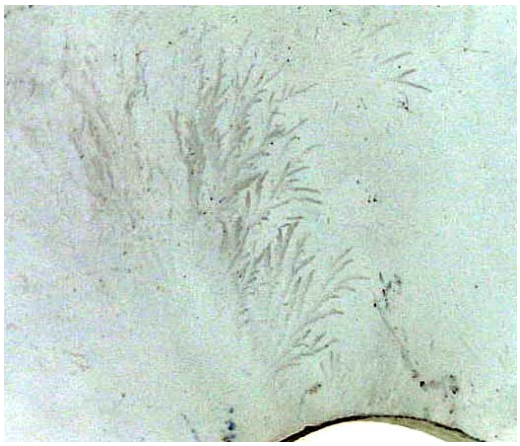
isoladores inteiros na parte superior da cadeia); (b) Configuração de número 4 (7 isoladores inteiros distribuídos quase uniformemente ao longo da cadeia).



(a)

(b)

(c)



(d)

Figura 3.10 – Fotografias (a) Da degradação do escudo, em forma circular, causada pelo contato do policarbonato com a saia de vidro; (b) Detalhe da degradação; (c) Degradação do escudo causada pela passagem de arco elétrico pela saia de vidro; (d) Aspecto dendrítico da degradação na superfície do escudo de policarbonato.

Na figura 3.8, observa-se que os valores de tensão disruptiva, para os ensaios com e sem escudo de policarbonato, foram próximos entre si. A configuração de número 4 – onde os isoladores estão distribuídos quase uniformemente ao longo da cadeia – apresentou melhor desempenho em relação às demais. Em freqüência industrial (figura 3.8 (a)), foi possível obter, para a configuração de número 4, valores de tensão disruptiva igual a 505,0 kV sem escudo, e 500,0 kV com escudo; a configuração de número 1 – na qual todos os 7 isoladores inteiros estão na parte superior da cadeia – apresentou o menor valor de tensão disruptiva em relação às demais (448,0 kV, sem escudo). Quando sob impulso de manobra com polaridade positiva (figura 3.8 (b)), a configuração de número 4 apresentou valor de tensão disruptiva igual a 661,0 kV sem escudo, e de 704,0 kV com escudo, sendo que o menor valor foi verificado para a configuração de número 1 (584,0 kV sem escudo). Finalmente, para impulso de manobra com polaridade negativa (figura 3.8 (c)), o valor de tensão disruptiva para a configuração de número 4 foi de 894,0 kV sem escudo, e de 876,0 kV com escudo; o pior valor ficou com a configuração de número 2 (732,4 kV sem escudo).

Verifica-se, pela figura 3.10, que alguns escudos de policarbonato, por ficarem em contato direto com a saia de vidro do isolador, sofreram uma pequena

degradação em forma circular, durante a ocorrência do arco elétrico. Este fato sugere que o escudo de policarbonato seja colocado na campânula do isolador, com furo central igual a 68 mm ± 1 mm, para não manter contato direto com a saia de vidro.

3.4 Conclusões

Os ensaios de alta-tensão realizados a seco e sem poluição, permitiram concluir que o policarbonato praticamente não altera os valores de tensão disruptiva da cadeia de isoladores. Ao sofrer descarga elétrica, o escudo polimérico não apresentou variações em suas dimensões pelo efeito da temperatura, nem tão pouco propiciou a formação de chamas. Sendo assim, o policarbonato pode ser utilizado na confecção dos escudos de proteção dos isoladores de vidro, a fim de minimizar a quebra por vandalismo nas torres de alta-tensão.

A configuração de número 4 foi a que apresentou melhor desempenho nos ensaios de tensão de disrupção, seja na freqüência industrial ou no impulso de manobra. Sendo assim, desejando proteger sete (7) isoladores de vidro de uma cadeia de 16 isoladores – número mínimo para intervenção com segurança pela equipe de linha viva numa linha energizada de 230 kV, sob boas condições atmosféricas – os escudos poliméricos devem ser instalados para proteger, de preferência, os isoladores distribuídos uniformemente ao longo da cadeia como, por exemplo, na configuração de número 4. Com isso, é possível obter a melhor tensão de suportabilidade para intervenção e minimizar os custos de implantação do escudo polimérico nas torres de alta-tensão.

3.5 Determinação do Valor Econômico do Escudo Polimérico

Segundo Gurgel (1995), o valor mercadológico de um produto é o valor monetário do conjunto de características de um produto que exerce funções que satisfazem as necessidades dos usuários. É o valor monetário que o usuário estaria disposto a pagar para receber os benefícios da posse e utilização do produto. Já o valor econômico, corresponde à somatória de todos os custos, despesas e margens de comercialização em que se incorre para o produto chegar e ficar no ponto de venda, exposto às decisões do usuário. Quando o valor mercadológico for superior ao valor econômico, o produto é viável comercialmente.

De acordo com Xavier (2003), o preço de venda de um isolador de vidro inteiro gira em torno de R$ 40,00. Numa linha de 230 kV são necessários 16 isoladores de vidro; logo, o preço desta cadeia de isoladores vale R$ 640,00. O preço de uma cadeia de isolador polimérico para linha de 230 kV é de aproximadamente R$900,00.

O escudo polimérico será plano, com formato circular, espessura de 6 mm e diâmetro igual a 300 mm ± 1 mm, lembrando que a saia de vidro possui diâmetro igual a 245 mm (capítulo 1). O escudo terá um furo central de raio igual a 68 mm ± 1mm (figura 3.11), para ser encaixado na campânula do isolador – sem que fique em contato com a saia de vidro, a fim de evitar sua degradação quando da ocorrência de descargas disruptivas.

Sendo assim, a chapa de policarbonato necessária para a confecção do formato circular deve ter inicialmente o formato quadrangular com lado medindo, no mínimo, 300 mm (área igual a 90000 mm²). A área útil do escudo de policarbonato pode ser calculada pela Eq. (3.1):

$$A = \pi.\left(R^2 - r^2\right)$$
$$A = 3{,}14.\left(15^2 - 3{,}4^2\right) \quad (3.1)$$
$$A = 670{,}54cm^2$$

onde:
A – Área útil do escudo (cm²);
π – Constante adimensional (~ 3,14);
R – Raio do escudo (cm);
r – Raio do furo central (cm).

A massa do escudo pode ser calculado pela Eq.(3.2):

$$m = d.v$$
$$m = 1{,}2.\left(A \cdot h\right)$$
$$m = 1{,}2.\left(670{,}54 \cdot 0{,}6\right) \quad (3.2)$$
$$m = 482{,}80g$$

onde:
m – Massa do escudo de policarbonato (g);
d – Densidade do policarbonato (1,2 g/cm³, tabela de propriedades em anexo);
A – Área do escudo (cm²);
h – Altura ou espessura do escudo (cm).

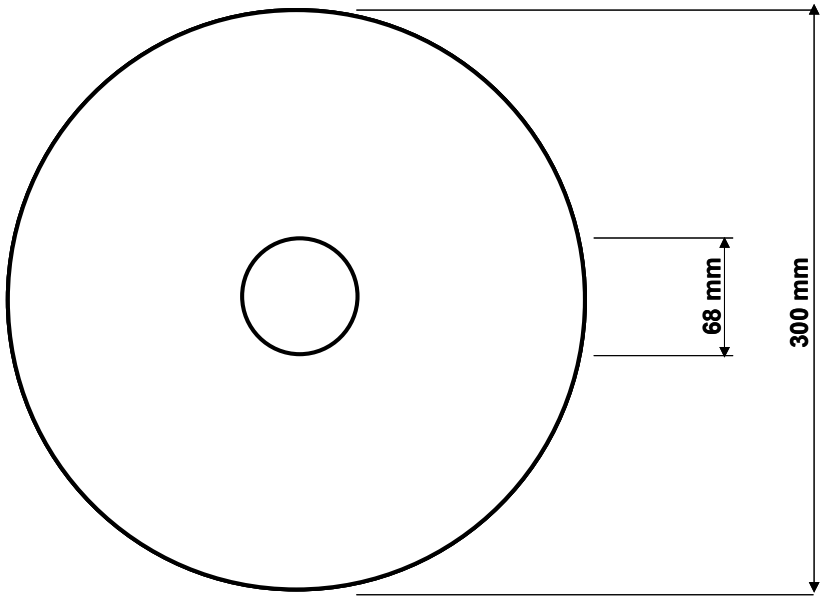


Figura 3.11 – Dimensões do escudo de policarbonato de espessura igual a 6 mm.

As operações utilizadas na confecção do escudo de policarbonato foram:

- Corte das chapas de policarbonato em formato circular, com diâmetro igual a 300 mm ± 1 mm, com serra tico-tico;

- Corte do furo central de diâmetro igual a 68 mm ± 1 mm, com furadeira de bancada e broca de 68 mm de diâmetro.

3.5.1 Ficha de Custos

A tabela 3.2 mostra o custo de fabricação do escudo de policarbonato.

Tabela 3.2 – Ficha de custos do escudo de policarbonato.

Matéria-prima	**Quant./produto**	**R$/quant.**	**R$/produto**
Chapa de policarbonato compacto	90000 mm²	0,0003 (*)	27,00

Equipamentos	**Hora-Máq./ produto**	**Perdas/ prod (40%)**	**R$/Hora-Máq.**	**R$/produto**
Serra tico-tico	300 s	120 s	1,50	0,175
Furadeira de bancada	60 s	24 s	1,50	0,035

Mão-de-obra	**Quant. operad**	**Hora-Homem/ produto**	**Perdas/ prod (40%)**	**R$/Hora-Homem**	**R$/produto**
Corte chapas	2	300 s	120 s	2,00	0,47
Furo central	1	60 s	24 s	2,00	0,047
				Total	**27,73**

(*) Informações no APÊNDICE 1.

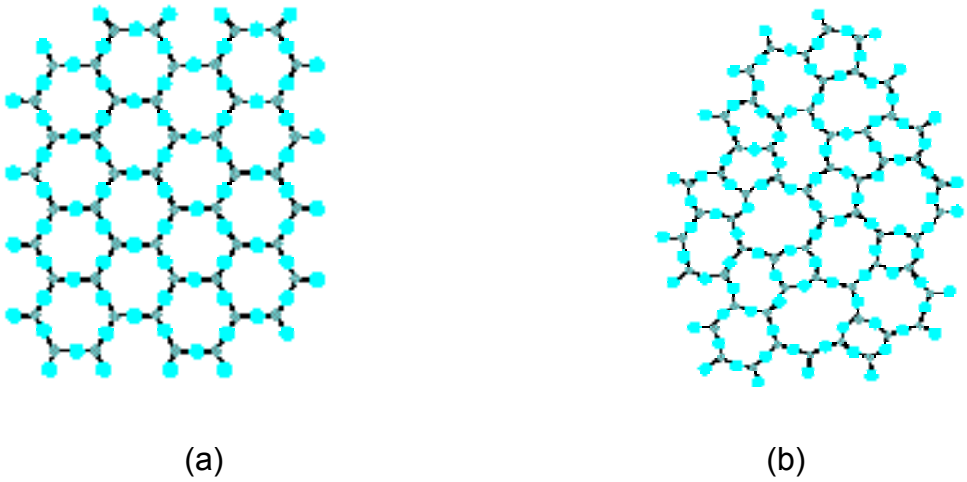
O valor econômico de um escudo é, portanto, igual a R$ 27,73. Utilizando escudos em todos os isoladores de uma cadeia de 230 kV, por exemplo, tem-se um gasto de R$ 27,73 x 16 = 443,68.

A utilização do escudo de policarbonato em apenas 7 isoladores de vidro, correspondentes ao número mínimo de unidades inteiras necessárias ao funcionamento normal de uma linha de 230 kV, por exemplo, pode reduzir os custos de utilização do escudo polimérico, de R$ 443,68 para R$ 194,11. A implantação de um processo de fabricação específico, adaptado para grande quantidade (produção em larga escala) contribui para a redução dos custos do produto.

4. IRRADIAÇÃO DO VIDRO DO ISOLADOR PARA MINIMIZAR A DEGRADAÇÃO DO ESCUDO DE POLICARBONATO POR RAIOS UV

4.1 Introdução

Vidros possuem propriedades especiais que não são encontradas em outros materiais, como madeira, metais e plásticos. A combinação de transparência e dureza em temperatura ambiente, além de propriedades dielétricas e resistência à corrosão para a maioria dos ambientes, tornam os vidros indispensáveis para muitas aplicações de engenharia. Segundo Alves *et al.* (2001), por definição, "*vidro é um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea*[5]*. Qualquer material, inorgânico, orgânico ou metal, formado por qualquer técnica, que exibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro"*. Os vidros diferem do cristal pela sua estrutura amorfa, que pode ser observada na figura 4.1.



(a) (b)

Figura 4.1 – Representação bidimensional típica: (a) De uma estrutura cristalina simétrica e periódica; (b) Da estrutura amorfa de um vidro.

O vidro do isolador pertence à família soda-cal, composto de óxidos de silício, cálcio e sódio (conforme descrito no capítulo 1). De acordo com Alves *et. al* (2001), este vidro é um dos mais comuns, sendo utilizado em diversas aplicações. A tonalidade da cor do vidro do isolador varia de esverdeada à incolor. É um vidro do tipo temperado, por isso apresenta resistência mecânica ao impacto relativamente alta em comparação a um vidro recozido; quando falha, sofre um processo de "estilhaçamento", produzindo numerosos e pequenos fragmentos. A saia de vidro do isolador possui formato de um disco e geometria especial para oferecer alta resistência às descargas disruptivas e radiações ionizantes. Tais características tornam este tipo de vidro um excelente dielétrico para linhas de transmissão.

O escudo de policarbonato, por ser um material polimérico, está sujeito à degradação pela ação de radiação nociva (ultravioleta, UV) da luz solar. Portanto, é desejável que o vidro do isolador possa oferecer uma proteção ao escudo através de

[5] A transição vítrea é a passagem do estado vítreo para o estado viscoelástico, através da chamada relaxação estrutural. O comportamento vítreo está associado a um corpo que praticamente não pode ser deformado nem permanentemente nem elasticamente à temperatura ambiente, sendo mais propenso a absorver a energia e dissipá-la, quebrando-se.

absorção parcial da radiação ultravioleta que incide sobre o policarbonato, para aumentar o seu tempo de vida útil nas linhas de transmissão. Sabe-se de literaturas que o vidro da família soda-cal absorve parcialmente as radiações ultravioleta e infravermelho de acordo com a lei de Beer-Lambert (Eq. 4.1) (Settle, 1997):

$$I = Io.e^{-\mu t} \qquad (4.1)$$

onde
I – Intensidade da radiação transmitida;
I_o – Intensidade da radiação incidente;
t – Espessura da amostra;
μ – Coeficiente linear de absorção, que depende da composição do material e do comprimento de onda da radiação.

Baseando-se nos argumentos apresentados acima, a possibilidade de proteção que poderia ser oferecida pelo vidro ao escudo é representada pela figura 4.2.

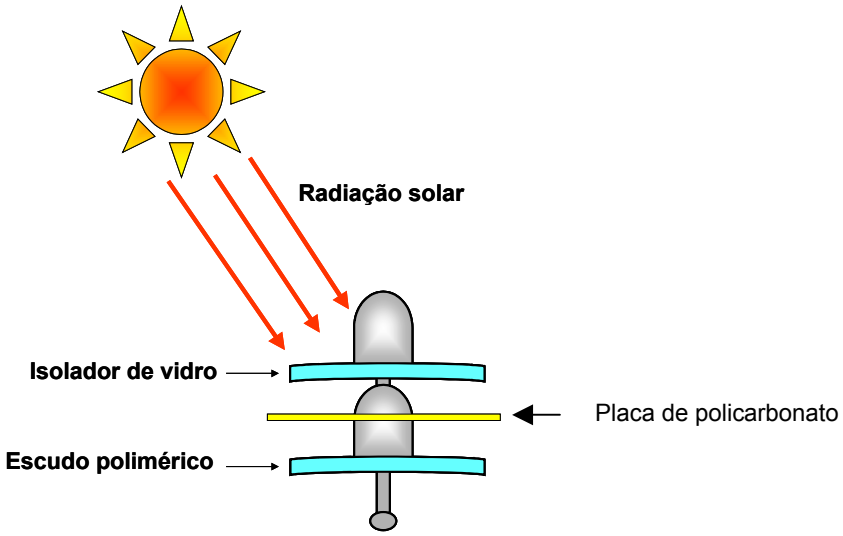


Figura 4.2 – Representação da incidência de radiação solar sobre o escudo polimérico, que pode ser protegido contra degradação pela saia de vidro do isolador.

A maior parte da radiação solar que chega à superfície da Terra consiste de radiação infravermelha (IV, ~55%), luz visível (Vis, ~40%) e ultravioleta (UV, ~5%) (figura 4.3). A radiação IV (780 - 300000 nm) é responsável pelo aumento da temperatura no material, por induzir rotações e vibrações moleculares. A radiação UV (180 - 400 nm) é considerada nociva por causar danos graves ao corpo humano e por ser capaz de romper ligações químicas em materiais expostos por tempo prolongado. Como conseqüência de sua ação, os raios UV causam perda de coloração, de durabilidade, de resistência física, química e mecânica nos materiais. Sabendo-se que alguns municípios do Nordeste brasileiro terem valores de radiação solar diária comparáveis aos das regiões mais ensolaradas no mundo (média anual da radiação solar diária é de 5,3 kWh/m² em Recife (Tiba *et al.*, 1998)), é desejável que o vidro dos isoladores absorvam boa parte da radiação UV, na tentativa de minimizar o envelhecimento do escudo polimérico.

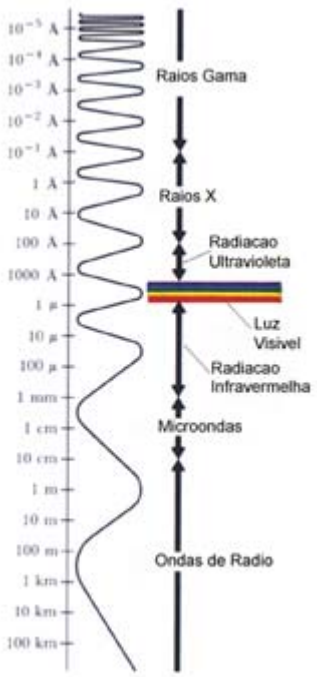


Figura 4.3 – Representação espectro da radiação ultravioleta, luz visível e radiação infravermelha no espectro eletromagnético.

A espectroscopia IV tem sido largamente utilizada para estudar e interpretar modificações estruturais em vidros. As bandas de absorção permitem identificar no vidro a presença de grupos defeituosos ou de defeitos induzidos por radiação UV e ionizante, e que afetam suas propriedades. Também pode ser utilizada para determinar baixa concentração de impurezas em vidros, como água, íons Fe^{+2}, Fe^{+3} e grupos OH (Goodyear & Lindberg, 1980; Agarwal & Tomozawa, 1997; Lucas, 1999; Tan, 1999; Abo-Naf *et al*., 2002; Kobayashi, 2003).

Na literatura encontram-se estudos sobre absorção UV em vidros para diferentes aplicações, como o desenvolvimento de revestimentos (*coatings*) para diminuir a transmissão de raios UV ao interior de edificações e automóveis (Morimoto *et al*.,1999; Sanderson *et al*., 2003). Propriedades ópticas de vidros são descritas por diversos autores (Goodyear & Lindberg, 1980; Rubin, 1985; Hannoyer *et al*., 1992; Uchino *et al*., 2000).

Para vidros soda-cal, as propriedades ópticas são bastante influenciadas por pequenas quantidades de elementos adicionados à composição química. Vidros soda-cal contendo pequenos níveis de ferro absorvem raios UV e IV. Para atender este propósito, cerca de 1% de ferro é adicionado à composição do vidro (Uchino *et al*., 2000). Outros agentes podem ser adicionados para diminuir a temperatura de fusão do material (Rubin, 1985).

A espectrofotometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica que permite determinar a composição química quantitativamente de materiais de forma não destrutiva (Hannoyer *et al*., 1992; Nogami *et al*., 1998). Estudos de amostras de vidros arqueológicos foram feitos por Kolbesen *et al* (1997) com FRX, apresentando a vantagem de requerer pequenas quantidades de amostras.

Nesse contexto, o vidro dos isoladores de alta-tensão foi caracterizado com as técnicas de espectroscopia UV-Vis e IV, análise química qualitativa por FRX, densidade e RMN de átomos de ^{29}Si e ^{27}Al.

4.2 Irradiação do Vidro do Isolador para Minimizar a Degradação do Escudo de Policarbonato

O aumento dos valores de absorbância UV no vidro dos isoladores de alta-tensão, com a utilização radiação ionizante gera coloração e melhoria de suas propriedades ópticas. Outras técnicas, entretanto, também são utilizadas em vidros para obtenção de alta absorbância UV. Podem ser colocados filmes ou películas sobre a superfície do vidro, ou mesmo adicionado elementos químicos em sua composição. Os revestimentos (*coatings*) são comumente usados para reduzir o aquecimento de edificações e proteger materiais contra degradação por UV, podendo manter ainda assim uma alta transmissão de luz visível (Morimoto *et al.*, 1999; Sanderson *et al.*, 2003). Já a adição de pequenas quantidades de elementos químicos na composição do vidro consegue promover um grande aumento da absorção de raios UV. Estes elementos podem a alterar a coloração dos vidros, como é o caso de óxidos de ferro, cromo e titânio. Óxidos de ferro possuem bandas de absorção no ultravioleta (Fe_2O_3, em 380 nm) e no infravermelho (FeO, em 1080 nm) e dão ao vidro uma coloração suavemente esverdeada (Goodyear & Lindberg, 1980; Rubin, 1985; Hannoyer *et al.*, 1992; Uchino *et al.*, 2000).

O uso de radiação ionizante de elevada energia (raios X, raios gama, elétrons, etc.) em vidros permite aumentar a absorção de raios UV, por induzir numerosas mudanças nas propriedades físicas do vidro. Um dos efeitos mais marcantes é a coloração visível, causada pelos centros de cores (defeitos) (Sheng *et al.*, 2002). Quando o vidro é submetido a altas doses de irradiação, adquire coloração escura, e sua densidade óptica aumenta proporcionalmente com a dose absorvida (Rodrigues Jr. & Caldas, 2002).

A irradiação de vidros soda-cal tem sido estudada há mais de quatro décadas, apesar da ênfase na pesquisa ter sido na prevenção do escurecimento de vidros usados em janelas de reatores e fibras ópticas. Recentemente, muitos estudos têm sido conduzidos para obtenção de dosímetros de altas doses feitos com vidros soda-cal (Zheng *et al.*, 1988; Rodrigues Jr. & Caldas, 2002; Teixeira & Caldas, 2002).

Um fato que deve ser considerado é que os centros de cores induzidos são instáveis à temperatura ambiente, ou seja, o vidro irradiado inicialmente apresenta uma rápida perda de cor por 30 dias no mínimo e, conseqüentemente, sua densidade óptica também diminui nesse tempo (Suszynska & Makalik, 2001; Teixeira & Caldas, 2002).

Os defeitos induzidos pela radiação gama (raios-γ) podem ser retirados através de tratamento térmico, conhecido como *isothermal bleaching*, por se tratar de um "clareamento" à temperatura constante (Zheng *et al.*, 1988; Suszynska & Makalik, 2001). Foi encontrado na literatura que Quezada & Caldas (1999) utilizaram temperatura de 300°C por 15 minutos para clarear totalmente o vidro.

Os isoladores de vidro de alta-tensão estão permanentemente expostos à radiação solar e podem atingir temperaturas acima de 60°C. Este fato aponta para a necessidade de se avaliar a estabilidade térmica da cor (estabilidade da densidade óptica) adquirida pelo vidro após a irradiação, para que o isolador não venha a sofrer clareamento durante o seu uso nas linhas de transmissão de energia elétrica.

Este capítulo trata do estudo das propriedades ópticas do vidro de isoladores de alta-tensão, com ênfase nos valores de transmitância nas regiões ultravioleta, visível e infravermelha .Posteriormente, será utilizada a técnica de irradiação gama no vidro dos isoladores na tentativa de potencializar a absorção de radiação UV e luz visível, para minimizar a degradação do escudo de policarbonato.

4.3 Materiais e Métodos

O vidro dos isoladores elétricos pertence à família soda-cal, tendo como principais componentes SiO_2, Na_2O e CaO, e no processo de fabricação dos isoladores, o vidro é temperado para aumentar sua resistência mecânica; em conseqüência, devido à tensão residual introduzida no material, seu corte resulta na quebra em muitos e pequenos pedaços, o que impossibilita a preparação de amostras nas dimensões necessárias aos ensaios de espectroscopia propostos neste trabalho. Sendo assim, para a realização dos experimentos com o vidro do isolador, foram retiradas amostras de blocos de vidro, largamente utilizados em construção civil. Alguns exemplos de blocos de vidro coloridos e incolores estão ilustrados na figura 4.4. Para o presente estudo, estes blocos foram adquiridos do mesmo fabricante dos isoladores em estudo. Para a manufatura destes blocos, a mesma massa fundida utilizada é a mesma daquela utilizada para os isoladores, o que garante similaridade na composição química entre os dois produtos (informações obtidas em visita técnica à fábrica de isoladores de vidro, em setembro de 2002).

Figura 4.4 – Blocos de vidro soda-cal, de composição química semelhante ao vidro do isolador elétrico.

Foram analisadas amostras de bloco de vidro incolor provenientes do mesmo fabricante (fabricante *A,* bloco 1) do isolador de alta-tensão. Para comparação, também foram utilizados mais 8 blocos de vidro de outros fabricantes (*B*, *C* e *D*), sendo três incolores e cinco coloridos (Yanaguizawa *et al.*, 2003). As amostras foram cortadas pelo processo de trepanação, com auxílio de uma furadeira de bancada (Ferrari, FGC-16) e broca diamantada (Dinser) de diâmetro 18,0 mm. O polimento foi realizado com carbeto de silício (# 80, # 320, # 800, # 2000, # 4000 *meshes*) e acabamento óptico com alumina. A espessura final das amostras foi de 5,0 mm $\pm$ 1,0 mm. Todas as medições foram feitas à temperatura ambiente (aproximadamente 25°C).

A irradiação dos vidros soda-cal foi realizada com dois tipos de fontes de radiação ionizante: (i) raios-X utilizando-se tubo com alvo de ródio e potência de 30-60 kV por 50-100 mA, (ii) raios-γ utilizando fonte de isótopo de cobalto, ^{60}Co. Para melhor controle do efeito das doses de radiação, as amostras provenientes do bloco 1 foram irradiadas com cinco diferentes doses com raios-γ, possibilitando estudar o efeito da dose de irradiação nas propriedades ópticas do vidro. Para cada dose foram utilizadas três amostras, totalizando 15 amostras. Todas as medidas foram realizadas à temperatura aproximada de 20°C. As irradiações foram feitas no irradiador JS 7500 MDS Nordion (EMBRARAD, Cotia –SP), com atividade nominal de 54,7 PBq (1,48 Mci). As doses utilizadas foram: 10 kGy, 20 kGy, 30 kGy, 50 kGy e 60 kGy.

As mudanças nas propriedades ópticas causadas pela radiação gama foram tomadas a partir do quinto dia após a irradiação das amostras, e monitoradas por

161 dias para avaliar o processo de perda de cor no vidro. Neste intervalo de tempo, as amostras foram estocadas à temperatura ambiente (25°C aproximadamente), ao abrigo da luz e calor. A densidade óptica das amostras irradiadas foi medida com densitômetro digital M.R.A no Laboratório de Dosimetria e Proteção Radiológica do Departamento de Energia Nuclear da UFPE.

Os espectros de absorção UV-Vis foram obtidos com espectrofotômetro Perkin-Elmer Lambda 6, duplo feixe entre 190 nm e 900 nm. Os espectros de transmitância IV foram medidos no espectrofotômetro Bruker-IFS 66 na faixa 5.300-400 cm^{-1}, ambos os equipamentos pertencentes à Central Analítica do Departamento de Química Fundamental da UFPE. A análise química por FRX foi feita no Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com espectrômetro modelo Philips PW 2400-00, utilizando-se tubo com alvo de ródio e potência de 30-60 kV por 50-100 mA; o tempo de medição de cada amostra foi de 15 minutos. A alteração estrutural dos vidros também pode ser estudada por espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) para obtenção do número de coordenação de átomos de ^{27}Al e ^{29}Si (Jones *et al*., 2001; Pratesi *et al*., 2001). As medidas de RMN foram realizadas com espectrômetro modelo Varian Unity Plus 300, nas freqüências de 78,158 e 59,592 MHz para observação dos núcleos de ^{27}Al e ^{29}Si, respectivamente, na Central Analítica do Departamento de Química Fundamental da UFPE.

Para avaliar e simular o efeito da temperatura na perda da capacidade absorção de radiações ultravioleta e infravermelho, as amostras de vidro foram submetidas, após 154 dias de irradiação gama, a um tratamento térmico a 70°C, por um período de 7 dias, utilizando a estufa modelo Nevoni NV 1.4. Após este período (somando 161 dias após a irradiação), foram obtidos novamente os espectros de absorção UV/Vis e IV.

Para um estudo de correlação dos valores de absorção entre as radiações UV/Vis e IV, foi determinada a densidade das amostras, com balança analítica YKD01 Sartorius, precisão de 0,01mg, pelo método de Arquimedes, segundo a Eq.(4.2):

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(fl)}{W(a) - W(fl)} \tag{4.2}$$

onde:

ρ -- Densidade da amostra de vidro (g/cm³);

ρ *(fl)* – Densidade da água à temperatura T de ensaio[6] (g/cm³);

W (a) – Massa da amostra no ar (g);

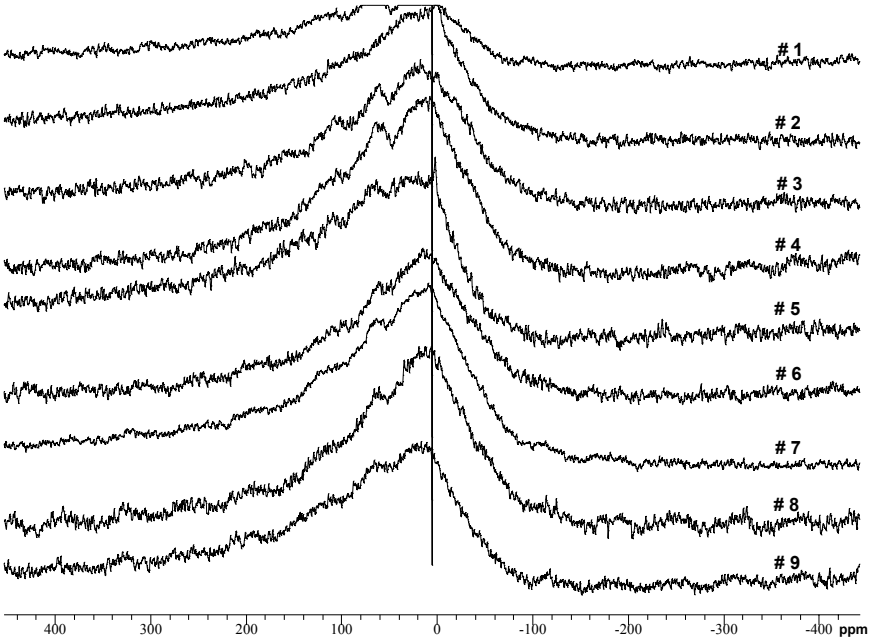
W (fl) – Massa da amostra na água (g).

Para T = 24°C, obtém-se o valor tabelado para densidade da água igual a 0,99732 g/cm^3 (Sartorius, 2003).

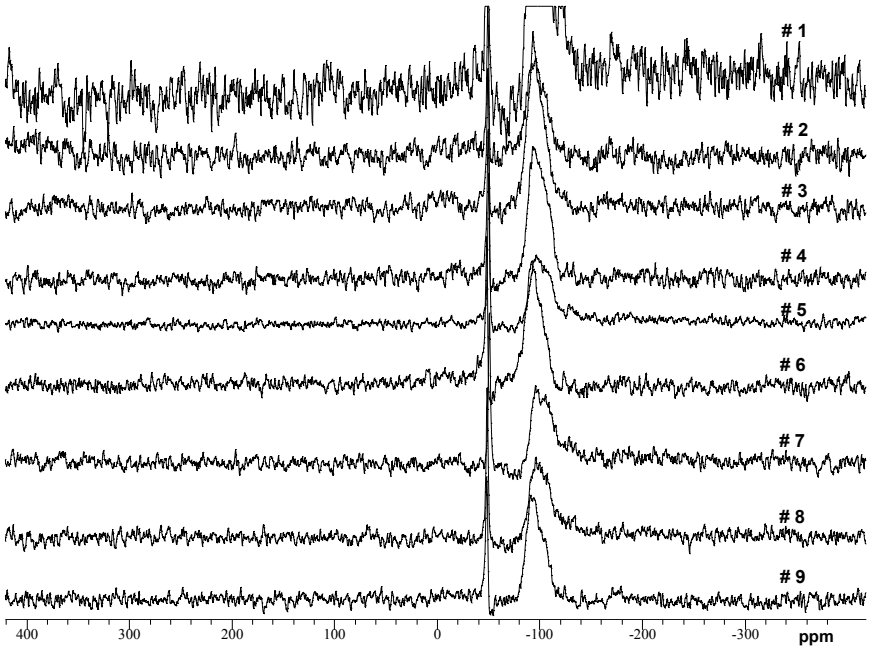
4.4 Resultados e Discussão

A figura 4.5 mostra os resultados obtidos por RMN dos núcleos em torno do ^{29}Si e ^{27}Al. A tabela 4.1 apresenta a composição química qualitativa dos blocos analisados, bem como a densidade obtida experimentalmente.

[6] Valor tabelado (Sartorius, 2003)



(a)



(b)

Figura 4.5 – Espectros de RMN para (a) ^{27}Al; (b) ^{29}Si.

Tabela 4.1 – Resultados de medidas de densidade e análise química por FRX das amostras de vidros soda-cal.

Bloco	Cor	Fabricante	Densidade (g/cm³)	Composição química qualitativa determinada por FRX								
				Si	Na	Ca	Al	Fe	K	Mg	Sr	Zr
1	Incolor	A	2,51493	•	•	•	•	•	•	•	•	-
2	Incolor	B	2,49236	•	•	•	•	•	•	-	-	-
3	Fumê	C	2,48045	•	•	•	•	•	-	•	-	•
4	Incolor	C	2,48953	•	•	•	•	•	•	-	-	-
5	Incolor	D	2,49404	•	•	•	•	•	•	-	-	-
6	Fumê	D	2,49717	•	•	•	•	•	•	-	-	-
7	Amarelo	D	2,50346	•	•	•	•	•	•	-	-	-
8	Verde	D	2,49823	•	•	•	•	•	•	-	-	-
9	Azul	D	2,49805	•	•	•	•	•	•	-	-	-

(•) detectado; (-) não detectado.

Observa-se que os espectros do núcleo de ^{27}Al (figura 4.5 (a)) são bem largos, variando de 150 ppm a –100 ppm. Isto pode ser explicado pela pequena quantidade de átomos de Al e sua distribuição na estrutura vítrea. Os espectros do núcleo de ^{29}Si (figura 4.5 (b)) apresentam um sinal em –48,89 ppm proveniente do próprio porta-amostras; a faixa de sinais do ^{29}Si é pequena, variando de –91 ppm a –96 ppm, o que significa haver uma estrutura coerente no vidro.

A figura 4.6 mostra os espectros UV-Vis medidos para os vidros soda-cal, ao passo que a figura 4.7 apresenta os espectros IV para as amostras de vidro soda-cal. Os resultados estão apresentados em porcentagem de transmitância por comprimento de onda. A absorbância e a transmitância estão relacionadas pela Eq.(4.3) (Settle, 1997):

$$A = - \log T \qquad (4.3)$$

onde:
A – Absorbância (u.a.);
T – Transmitância (%).

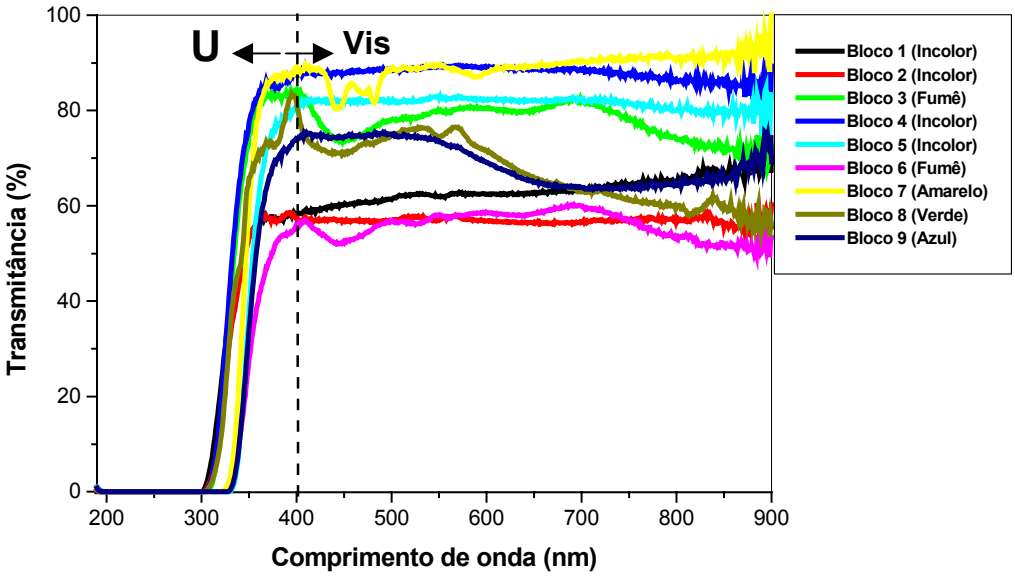


Figura 4.6 – Espectros de transmitância UV-Vis para vidros soda-cal.

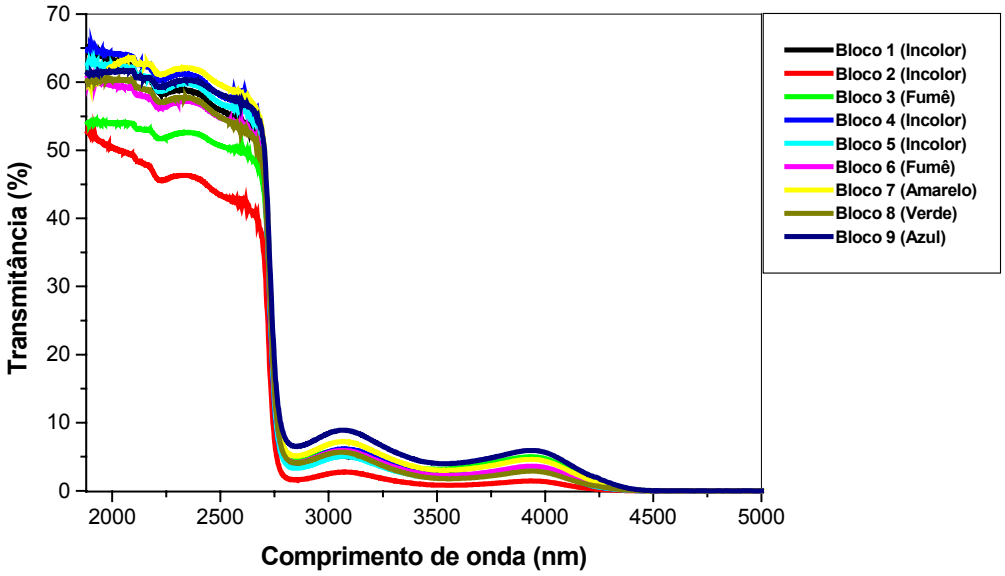


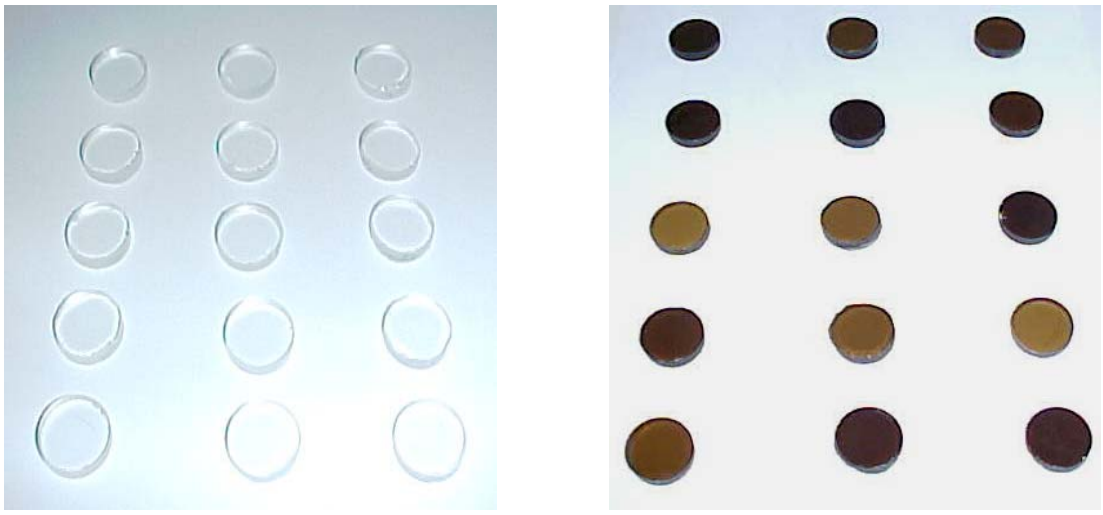
Figura 4.7 – Espectros de transmitância IV para vidros soda-cal.

Nos espectros da figura 4.6, verifica-se que até 300 nm aproximadamente, há total absorção de radiação UV pelas amostras. Definindo o *cut-off* como sendo o comprimento de onda abaixo do qual não há transmissão de raios UV, foi determinado para o vidro do isolador (bloco 1) valor de *cut-off* igual a 325 nm. Entre 325 nm e 400 nm ocorre aumento da transmitância até atingir o valor de 86%, que se mantém aproximadamente constante em toda a região do visível (até 900 nm). O vidro do isolador não absorve totalmente os raios UV na região compreendida entre 300 nm e 400 nm, que é justamente uma região de transição, onde ocorre aumento da transmitância do valor zero até 86%. Observa-se ainda que a coloração de alguns blocos não implica em maior valor de transmitância UV em relação aos vidros incolores.

Resultados semelhantes de transmitância UV foram obtidos na literatura. Morimoto *et al*. (1999) encontrou em vidros revestidos de CeO_2-TiO_2 valores de transmitância igual a zero em torno de 330 nm. A partir deste ponto, verificou aumento na transmitância para o valor máximo de 80%.

Como se observa pela figura 4.7, a transmitância IV para o bloco 1 possui valor máximo de 83% entre 1890 nm e 2100 nm. A partir de 2700 nm o valor de transmitância reduz drasticamente para cerca de 11%, até que, em 4500 nm, a transmitância atinge valor zero. Verifica-se a existência de bandas de absorção em torno de 2230 nm, 2510 nm, 2870 nm e 3450nm. Na literatura, Kobayashi (2003) determina a existência de bandas de absorção OH em sílica fundida, em torno de 2700 nm, bem como banda de absorção em vidros silicatos em torno de 2750 nm.

Após a irradiação, todas as amostras ficaram escurecidas, num tom entre marrom e fumê. A figura 4.8 apresenta a comparação entre amostras incolores e escurecidas por irradiação. A figura 4.9 representa a relação entre densidade óptica e a dose aplicada nas amostras de vidro, enquanto que a figura 4.10 mostra os valores de densidade óptica em função do tempo que foi monitorada por 42 dias.



(a) (b)

Figura 4.8 – Amostras de vidro: (a) Antes da irradiação, (b) Após irradiação com raios-γ.

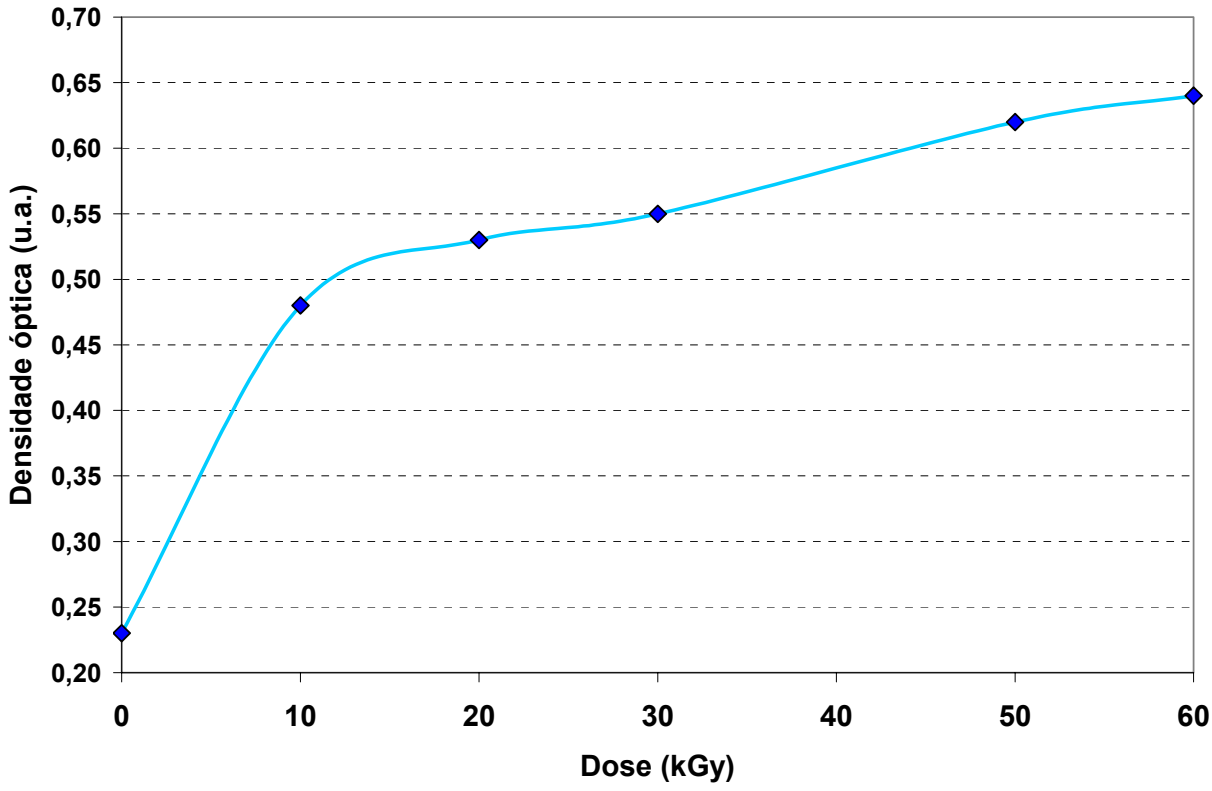


Figura 4.9 – Densidade óptica em função da dose de irradiação gama (^{60}Co) em amostras de vidro soda-cal, após 5 dias de irradiação.

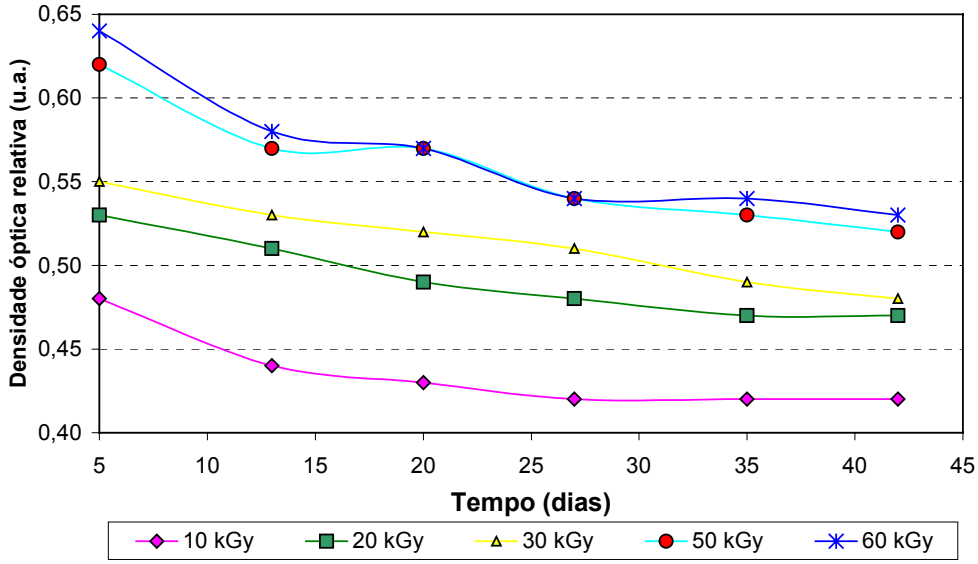


Figura 4.10 – Perda de cor observada nas amostras de vidro soda-cal, irradiadas com diferentes doses (^{60}Co).

Pela figura 4.9, verifica-se que doses maiores foram responsáveis por maior densidade óptica (maior absorbância), assim como determinado por Sheng *et al*. (2002), devido à geração de mais centros de cores. A partir de 40 kGy, a densidade óptica começa a estabilizar-se, indicando uma possível saturação.

Observa-se pela figura 4.10, que a densidade diminuiu com o tempo e, por volta do 30° dia, atinge estabilização. Valores semelhantes foram encontrados na literatura por Teixeira & Caldas (2002) com vidros soda-cal comerciais (figura 4.11). Segundo Zheng *et al.* (1988), a perda de cor é linear no período compreendido entre 2 h e 100 h e acima deste valor torna-se mais lenta.

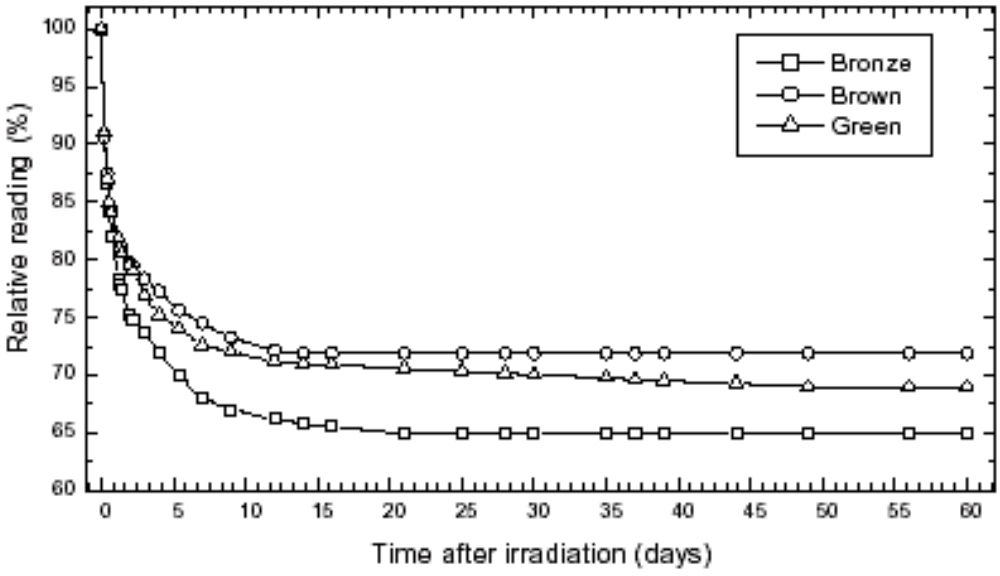


Figura 4.11 – Perda de cor observada por Teixeira & Caldas (2002) em vidros soda-cal comerciais).

A figura 4.12 apresenta os espectros de transmitância UV-Vis das amostras irradiadas, medidos até 161 dias após a irradiação.

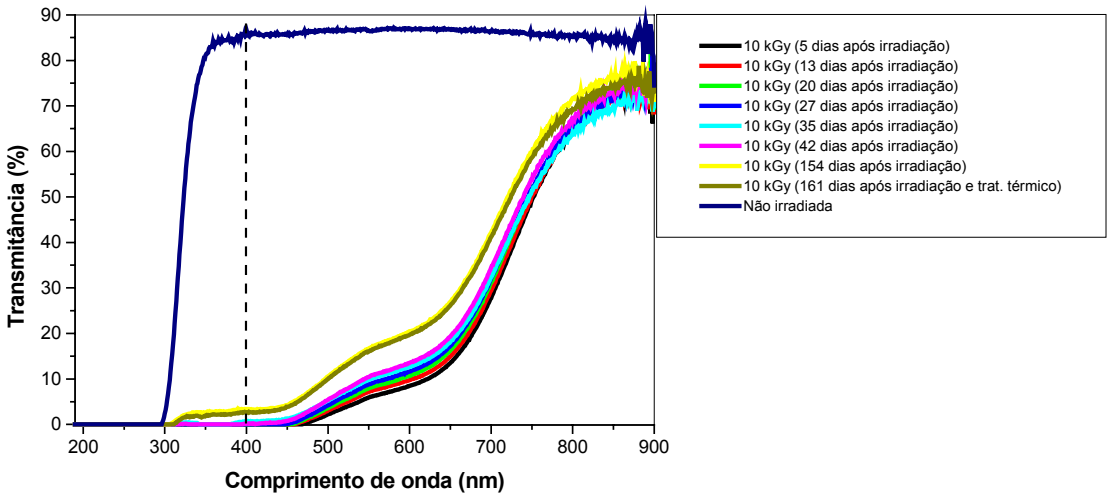


Figura 4.12 – (a) Espectros de absorção UV-Vis para amostras de vidro soda-cal irradiadas com 10 kGy.

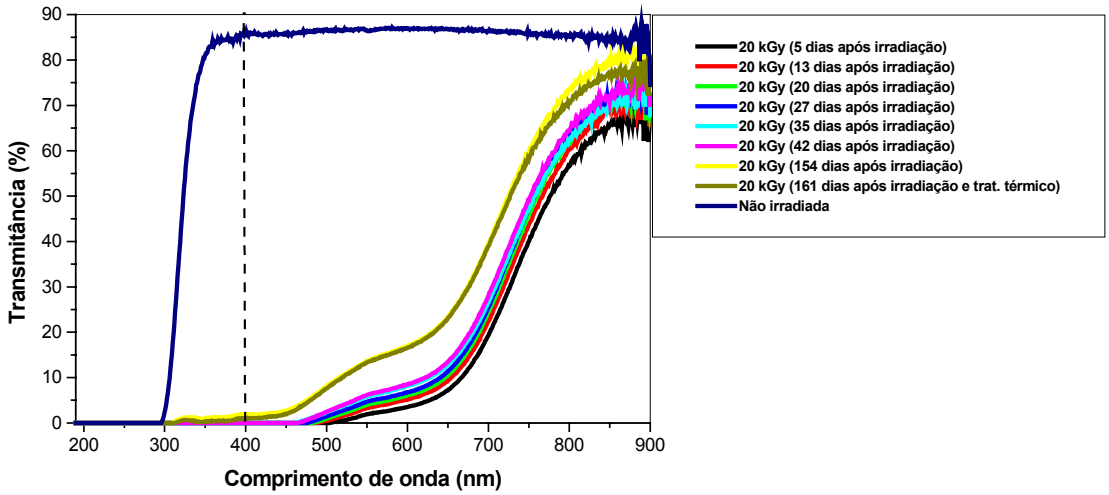


Figura 4.12 – (b) Espectros de absorção UV-Vis para amostras de vidro soda-cal irradiadas com 20 kGy.

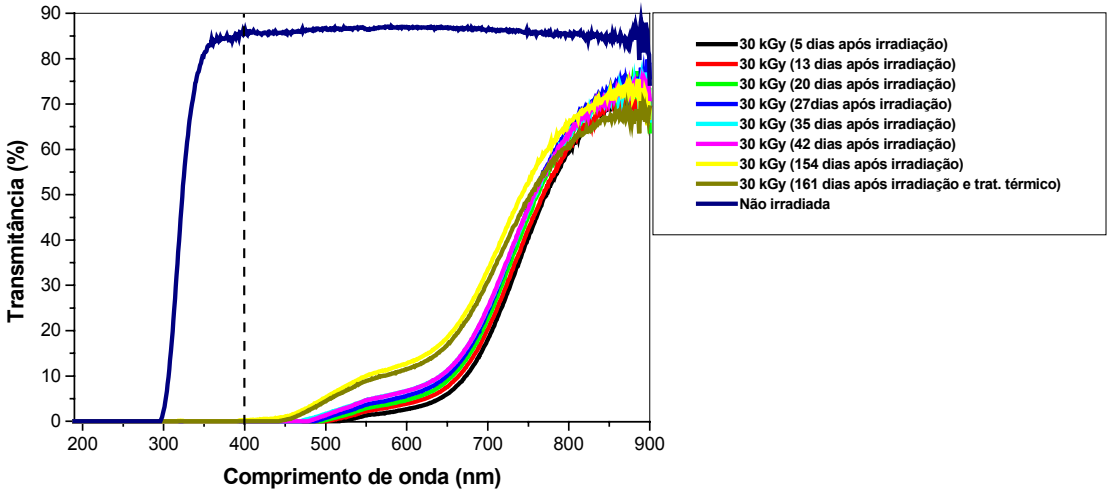


Figura 4.12 – (c) Espectros de absorção UV-Vis para amostras de vidro soda-cal irradiadas com 30 kGy.

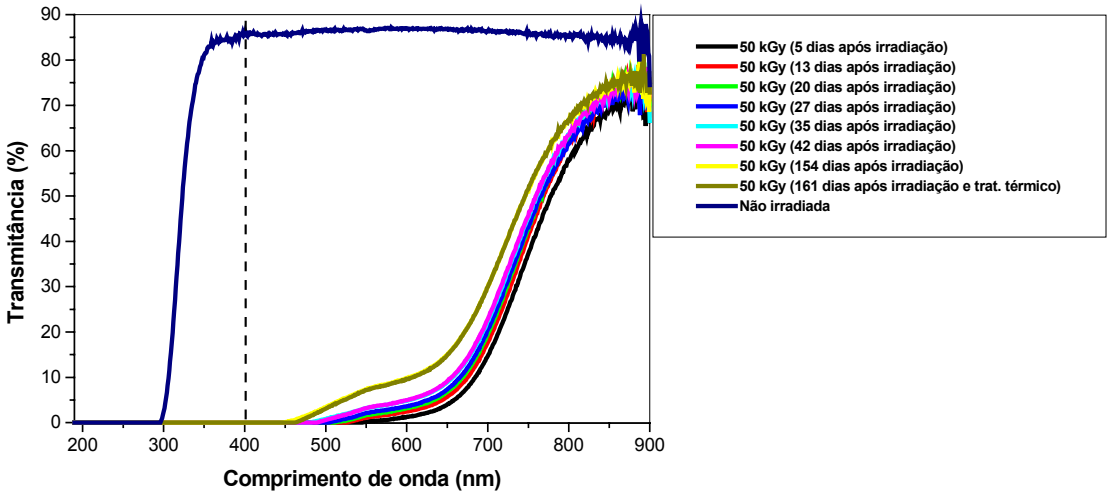


Figura 4.12 – (d) Espectros de absorção UV-Vis para amostras de vidro soda-cal irradiadas com 50 kGy.

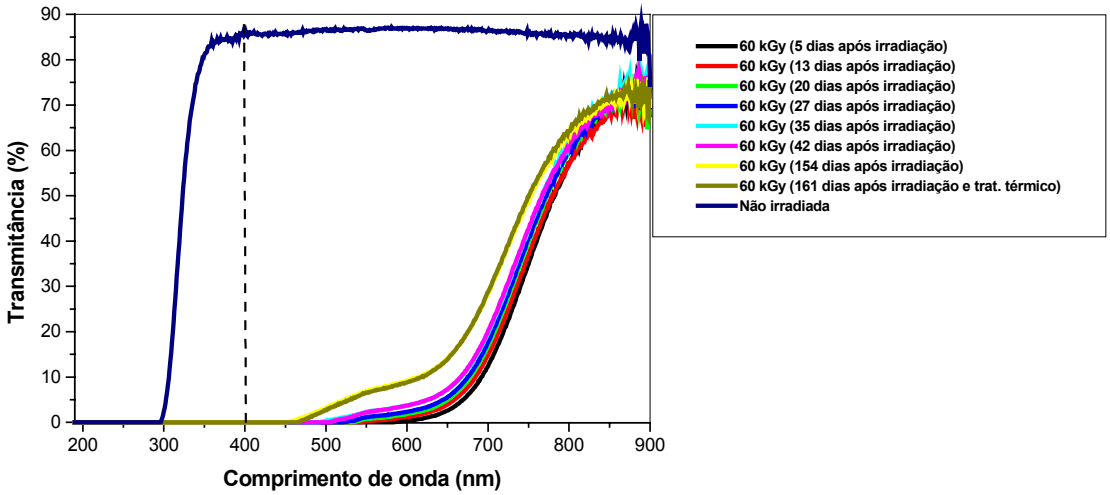


Figura 4.12 – (e) Espectros de absorção UV-Vis para amostras de vidro soda-cal irradiadas com 60 kGy.

É possível verificar na figura 4.12 que existe uma redução nos valores de *cut-off* [7] no UV, ao longo do tempo, assim como ocorre com a curva de densidade óptica da figura 4.9. Esta diminuição é conseqüência do fenômeno da perda de cor. Mesmo com a perda de cor, todas as amostras irradiadas ainda apresentaram *cut-off* superior 650 nm. Ainda pela figura 4.12 pode-se observar que, independentemente da dose aplicada, as curvas das amostras irradiadas possuem formas semelhantes. A irradiação das amostras causou diminuição da transmitância nas regiões do visível e ultravioleta, ao serem comparadas com a curva da amostra não irradiada – na qual o *cut-off* é observado em torno de 325 nm (região ultravioleta). Observa-se também, para doses de 10 kGy, a existência de bandas de absorção próximas a 420 nm e 620 nm. Com o aumento da dose, estas bandas ficam menos evidentes. Valores semelhantes foram encontrados por Suszynska & Makalik (2001) – bandas em 410

[7] O *cut-off* no UV corresponde ao valor de comprimento de onda abaixo do qual existe total absorção de raios UV. A região do ultravioleta localiza-se na faixa 180-400 nm.

nm e 630 nm – e por Sheng *et al.* (2002) – bandas em 430 nm e 620 nm – como pode ser visto na figura 4.13.

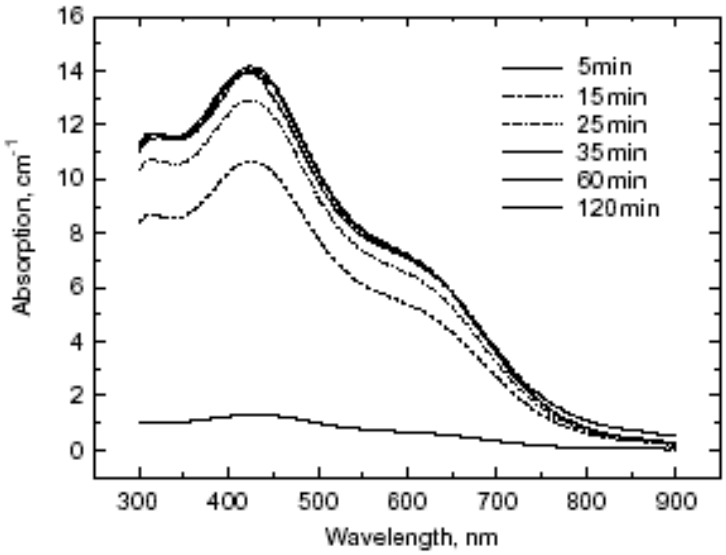


Figura 4.13 – Bandas de absorção UV-Vis encontradas por Sheng *et al.* (2002). Observa-se também aumento da absorbância em função da dose de irradiação aplicada.

A figura 4.14 mostra a relação entre os valores de densidade óptica (apresentados na figura 4.9) e de comprimento de onda no *cut-off* do UV das amostras irradiadas. Os valores de *cut-off* foram retirados dos espectros de absorbância UV-Vis da figura 4.12.

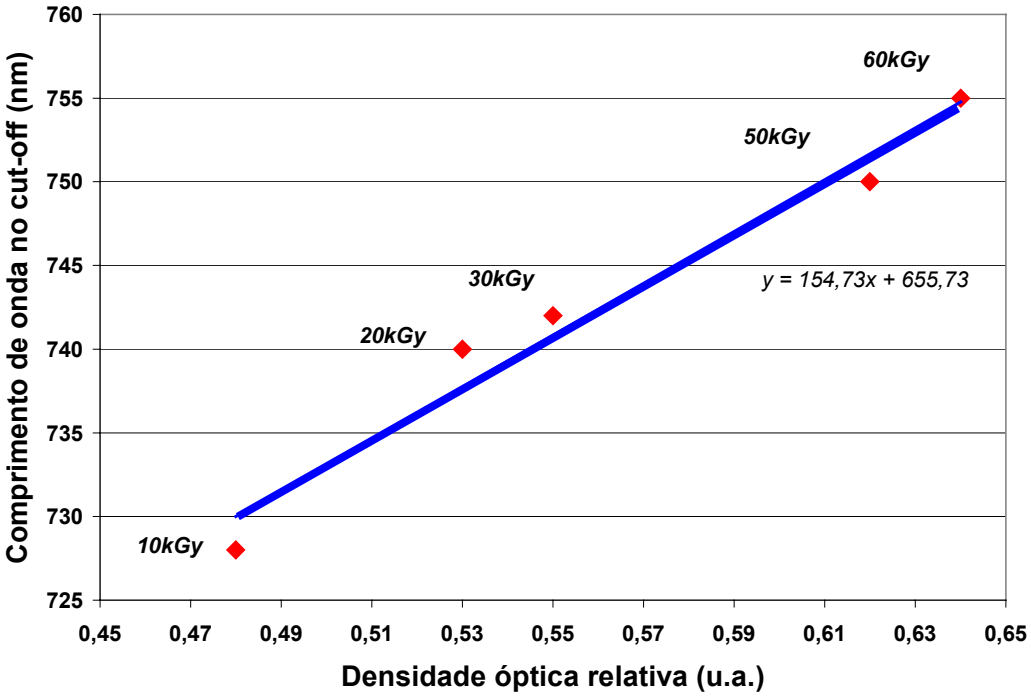


Figura 4.14 – Relação entre comprimento de onda do *cut-off* no UV e densidade óptica; valores correspondentes a 5 dias após a irradiação para as amostras de vidro soda-cal.

Nota-se, pela figura 4.14, que doses maiores de irradiação são responsáveis por maior absorbância de raios UV, evidenciado pelo aumento no valor de *cut-off*. Sheng *et al*. (2002) também observou, em suas amostras de vidro, variação no valor de absorbância em função da dose de irradiação recebida (figura 4.13). A equação apresentada no gráfico da figura 4.14 representa a correlação obtida experimentalmente entre a densidade óptica da amostra em função da dose de irradiação recebida. A partir da medição da densidade óptica da amostra, é possível estimar o valor do comprimento de onda em que ocorre absorção total de UV (*cut-off*).

A figura 4.15 mostra os espectros de transmitância IV para as diferentes doses de irradiação, medidos após 5 dias de irradiação.

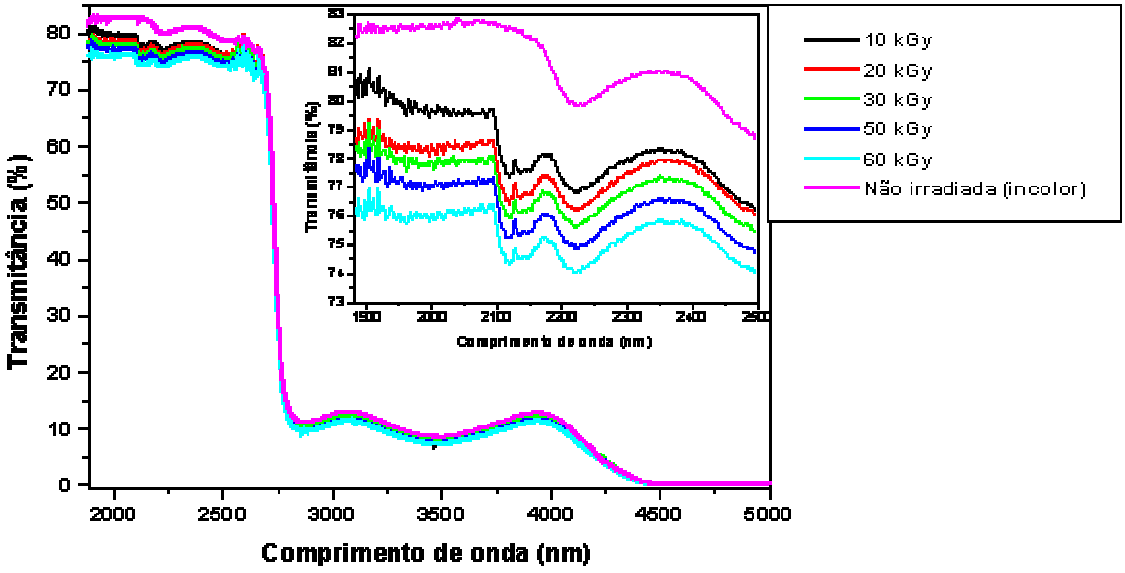


Figura 4.15 – Espectros de transmitância IV em amostras de vidro soda-cal após 5 dias de irradiação com diferentes doses (^{60}Co).

Da figura 4.15 é possível identificar que a variação na dose de irradiação não tem efeito sobre a transmitância IV nas amostras de vidro, pois todas as curvas apresentaram formato e valores semelhantes. Observa-se ainda que não há diferença entre os valores de transmitância IV antes e depois da irradiação porque as curvas de amostras irradiadas também são semelhantes à curva da amostra não irradiada. Entre 1900 nm e 2500 nm, nota-se diferenças em torno de 5% nos valores de transmitância de amostras irradiadas, uma vez que o valor máximo observado nesta faixa foi de 80% de transmitância para a curva de 10 kGy, e valor mínimo de 76% para a curva de 60 kGy, enquanto que a curva de amostra não irradiada apresentou o maior valor de transmitância (82%). Ainda é possível verificar nesta faixa que os valores de transmitância IV diminuem com o aumento da dose de irradiação. Os resultados da análise por espectrofometria IV evidenciam que os defeitos induzidos por irradiação não possuem influência sobre as propriedades de absorção do vidro a partir de 2700 nm, visto que todos os espectros ficaram sobrepostos nesta região.

4.5 Conclusões

Amostras de vidro soda-cal de composição química similar ao do isolador de alta-tensão foram caracterizadas com espectroscopia de UV-Vis e IV. Em termos de absorção de UV, o *cut-off* no ultravioleta foi observado em torno de 325 nm, e abaixo deste valor, praticamente não ocorre transmissão de raios UV pelas amostras. Um resultado interessante diz respeito à comparação dos dados de absorbância entre os vidros coloridos e incolores. Praticamente não se observou uma diferença considerável nos valores de absorção da radiação ultravioleta.

A irradiação com raios gama em vidro soda-cal permitiu obter valores de absorção UV-Vis superiores ao de vidro não irradiado. Os vidros irradiados adquiriram coloração escura e houve aumento da densidade óptica. Doses mais elevadas permitem maior escurecimento do vidro e maior absorção de radiação UV, devido à geração de centro-de-cor. Mesmo ocorrendo uma rápida perda de cor à temperatura ambiente (cerca 7% em 20 dias) os valores de absorbância UV obtidos foram excelentes, visto isto que na região ultravioleta do espectro eletromagnético (abaixo de 400 nm) todas as amostras absorveram praticamente toda a radiação – ou melhor, verificou-se transmissão próxima de zero até 600 nm aproximadamente. Apesar de terem sido utilizadas doses bastante elevadas no experimento, vidros irradiados com dose igual a 10 kGy já garantem transmitância próxima de zero em toda a região do espectro UV.

A perda da capacidade de absorver radiações UV/Vis após o ensaio de tratamento térmico das amostras a 70 C por um período de 7 dias, não foi observada.

A absorção de radiação UV pelo vidro do isolador, pode ser melhorada substancialmente com o processo de coloração do vidro por radiação ionizante, com o objetivo de obter um valor de *cut-off* maior do que 325 nm, dando maior proteção ao escudo de policarbonato.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

No presente trabalho de dissertação de mestrado, foi desenvolvido um escudo para proteger a parte vítrea de uma cadeia de isoladores de alta-tensão, na tentativa de minimizar a incidência de vandalismo nas torres de alta-tensão. Também foi estudada a viabilidade de utilização de placas de policarbonato na confecção dos escudos. Abordagens sobre resistência mecânica de um sistema de escudos foram avaliadas com ensaios de impacto e balístico. Ensaios de alta-tensão foram conduzidos para avaliar a performance do produto na presença de descargas elétricas em freqüência industrial e impulso de manobra. Ademais, foi realizado um estudo sobre a possibilidade de aumentar a proteção do escudo de policarbonato contra a radiação ultravioleta solar, utilizando radiação ionizante. A seguir, são listadas as principais conclusões e sugestões para estudo futuros.

A resistência ao impacto do escudo de policarbonato foi avaliada por ensaios de impacto sob tração com pêndulo. No ensaio de impacto com pêndulo, realizado com equipamento projetado e construído neste projeto, foi possível definir que o policarbonato tipo compacto, na espessura de 6 mm, é adequado para a confecção do escudo protetor. Por exemplo, a quebra do vidro do isolador protegido com este tipo de policarbonato ocorreu com energia de impacto próxima de 515 J – enquanto que sem proteção a quebra do vidro ocorre com aproximadamente 205 J de energia. Os resultados deste ensaio mostraram a existência de regiões mais sensíveis à quebra do que outras.

No ensaio balístico, o policarbonato material resistiu aos tiros de revólver calibre 22, revólver calibre 38, Glock calibre 38, Glock calibre 45 e Magnum calibre 44. projéteis disparados com Magnum 44 (equivalente a um rifle) somente conseguiram quebrar até 3 isoladores de vidro em cadeia quando cada isolador é protegido com o escudo.

Em termos de ensaios de alta-tensão, o policarbonato praticamente não exerceu influência sobre os valores de tensão disruptiva da cadeia de 16 isoladores de vidro. Em freqüência industrial (60 Hz), uma cadeia de 16 isoladores de vidro, possuindo apenas 7 unidades inteiras – distribuídas quase uniformemente ao longo da cadeia – apresentou valor de tensão disruptiva igual a 500 kV sem escudos, contra 505 kV com 10 escudos (colocados nos isoladores mais superiores da cadeia). O policarbonato apresentou boa estabilidade dimensional quando da ocorrência de arco elétrico, e não propiciou a formação de chama.

Medidas espectroscópicas de ultravioleta mostraram que a camada de proteção contra a radiação UV presente nas chapas de policarbonato permite que o mesmo absorva substancialmente os raios nocivos e aumente sua durabilidade. Por outro lado, a técnica de irradiação do vidro com raios-γ possibilitou uma melhoria substancial nos valores de absorção UV do vidro dos isoladores. O *cut-off* que era observado em torno de 325 nm passou para valores acima de 600 nm após a irradiação com diferentes doses de raios-γ. A influência dos fatores tempo e temperatura no processo de perda de cor no vidro (*fading*), foi avaliada com tratamento térmico das amostras irradiadas, feito a 70°C por sete dias. Os resultados indicaram que o poder de absorção de UV induzido pela irradiação com raios-γ é mantido após o tratamento térmico a 70°C, e que as propriedades do vidro, características de vidros soda-cal, estabilizaram-se após os primeiros 30 dias de irradiação.

Para estimar o valor de *cut-off* no vidro em função da dose de irradiação absorvida – o qual é determinado com espectrômetro de ultravioleta – foi obtida, no presente trabalho, uma correlação linear entre os valores da densidade óptica do

material em função dos valores de *cut-off* das amostras do vidro, irradiadas com diferentes doses de raios-γ.

Em termos de custo, foi calculado para o escudo de policarbonato o valor de R$ 27,73. Por ser leve (aproximadamente 485 g), o escudo não prejudica o desempenho mecânico da cadeia de isoladores. O material é fácil de ser usinado, não prejudica o meio ambiente e também não atrai a atenção de curiosos nas linhas de transmissão de energia elétrica, pela ausência de coloração.

5.2 Trabalhos Futuros

Uma vez desenvolvido e avaliado o escudo de policarbonato, a implantação do produto no campo – ou seja, nas cadeias de suspensão das linhas de transmissão – deve ser conduzida para verificar a eficácia do produto em minimizar a quebra dos isoladores de vidro por vandalismo. O monitoramento em médio/longo prazo é importante para que sejam feitos ajustes e correções no produto, assim como avaliar o efeito da presença do campo elétrico intenso. Isoladores de vidro irradiados com raios-γ também poderão ser instalados nas linhas de transmissão, juntamente com os escudos de policarbonato.

O controle do desempenho dos escudos poderá ser feito através de coletas periódicas do produto instalado, para avaliar as propriedades mecânicas (resistência ao impacto), ópticas (absorção de raios UV, amarelamento), elétricas (rigidez dielétrica, resistência ao arco) e físicas (estabilidade dimensional) do escudo.

É importante que também sejam feitos ensaios de alta-tensão com escudos na presença de poluição e névoa, para o estudo do grau de interferência da poluição/ sujeira no desempenho elétrico do policarbonato.

Para avaliar as regiões mais frágeis do vidro de um isolador, há necessidade de se realizar estudos sistemáticos com equipamento de impacto aliado à análise através de fotoelasticimetria (tensão residual).

Os valores de resistência ao impacto do escudo de policarbonato podem ser melhorados utilizando chapa mais espessa de policarbonato e/ou reforçada com fibra de vidro. Outra alternativa consiste na utilização de novos materiais substitutos, que venham a atender satisfatoriamente as funções do produto – como é o caso da fibra de poliaramida (kevlar®), de custo elevado.

O estudo de vidros soda-cal irradiados também pode ser conduzido para a obtenção de dosímetros de termoluminescência, com doses inferiores a 10 kGy.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-NAF, S.M.; EL BATAL, F.H.; AZOOZ, M.A. Characterization of some glasses in the system SiO_2, Na_2O·RO by infrared spectroscopy. *Materials Chemistry and Physics*, Cairo, v.77, p.846-852, 2002.

AGARWAL, A.; TOMOZAWA, M. Correlation of silica glass properties with the infrared spectra. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Nova Iorque, v.209, p.166-174, 1997.

ALBUQUERQUE, J.A.C. *O plástico na prática*. 2.ed. Porto Alegre, Sagra Luzzatto, 1999, 295p.

ALVES, O.L.; GIMENEZ, I.F.; MAZALI, I.O. Vidros. *Química Nova na Escola*, Campinas, v.2: p.9-20, fev. 2001.

ARAÚJO, E.S.; KHOURY, H.J.; SILVEIRA, S.V. Effects of gamma-irradiation on some properties of durolon polycarbonate. *Radiation Physics and Chemistry*, Recife, v.53, p.79-84, 1998.

BERNSTORF, R.A.; NIEDERMIER, R.K.; WINKLER, D.S. *Polymer compounds used in high voltage insulators.* 1.ed., Mohawe, Hubbell power Systems, 2000, 12p.

BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E.H.; GRULKE, E.A. 1999. Properties. In: *Polymer Handbook*, 4.ed. Canadá, John Wiley & Sons, 1999, p. 1325.

DAY BRASIL. *LEXAN ®XL10*. Disponível em <http://www.daybrasil.com.br/produtos/construcao/lexan_xl10-propriedades.asp> Acesso em 18 nov.2003.

CHESF, Recife. *SILT: Sistema de Informações de Linhas de Transmissão*. Recife, 2001.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. Ensaio de impacto. In: *Ensaios dos Materiais*. 1.ed. Rio de Janeiro, LTC Livros Técnicos e Científicos, 2000, p.154-164.

GARCIA, R.W.S.; TORRES, M.S.; SILVA JR., F.R.; GOMES JR.,E. Avaliação de isoladores poliméricos submetidos a ensaio de envelhecimento acelerado. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., Pará, 1997. *Anais.* Pará, 1997.

GE PLASTICS. *LEXAN ® Resina de policarbonato*. Disponível em <http://www.geplastics.com.br/resins/materials/lexan.html> Acesso em 18 nov.2003.

GERETOVSZKY, Z.; HOPP, B.; BERTÓTI, I.; BOYD, I.W. Photodegradation of polycarbonate under narrow band irradiation at 172 nm. *Applied Surface Science*, Szeged, v.186, p.85-90, 2002.

GOODYEAR, J.K. & LINDBERG, V.L. Low absorption flat glass for back surface solar reflectors. *Solar Energy Materials*, Michigan, v.3, p.57-67, 1980.

GURGEL, F.C.A. *Administração do produto*. 1.ed. São Paulo, Atlas, 1995, 150p.

HANNOYER, B.; LENGLET, M.; DÜRR, J.; CORTES, R. Spectroscopic evidence of octahedral iron (III) in soda-lime silicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Paris, v.151, p.209-216, 1992.

JONES, A.R.; WINTER, R.; GREAVES, G.N.; SMITH, I.H. MAS NMR study of soda-lime silicate glasses with variable degree of polymerization. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Gales, v.293-295, p.87-92, 2001.

KOBAYASHI, K. Development of infrared transmitting glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Yokohama, v.316, p.403-406, 2003.

KOBAYASHI, S.; MATSUZAKI, Y.; MASUYA, H.; ARASHITRANI, Y.; KIMATA, R. Development of composite insulators for overhead lines. *Furukawa Review*, n.19, p.129-135, 2000.

KOLBESEN, B.O.; WEGSTEIN, M; URBAN, H.; ROSTAM-KHANI, P.; WITTERSHAGEN, A. Total-reflection X-ray fluorescence spectrometry, a powerful tool for semiquantitative analysis of archaeological glass samples. *Spectrochimica Acta B*, Frankfurt, v.52, p.1057-1061, 1997.

LUCAS, J. Infrared glasses. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Rennes Cedex, v.4, p.181-187, 1999.

MANO, E.B. *Polímeros como materiais de engenharia*. 1.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1996, 197p.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Department of Mechanical Engineering, Cambridge. *Isotropic linear elastic stress concentration*, Cambridge, 2002, 18p.

MELONI, A.E.M.; BENTO, A.L.S.; MORAES, A.C.R.; JUSTO, L.F.; PEREIRA, M.V.; VALK, R.G.; REZENDE, R.F. Análise técnico-econômica da utilização de isoladores compostos, de porcelana ou de vidro em linhas de transmissão de energia elétrica. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16., Campinas, 2001. *Anais.* Campinas, 2001.

MORIMOTO, T.; TOMOGANA, H.; MITANI, A. Ultraviolet Ray absorbing coatings on glass for automobiles. *Thin Solid Films*, Yokohama, v.351, p.61-65, 1999.

NAITO, K. The insulator industry in Japan. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Nagoya, v.9, n.1, p.7-14, 1993.

NBR 6936. *Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão*. ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, abr.1992.

NIGRI, A.I. Desempenho de isoladores de linhas de transmissão sob o ponto de vista da manutenção. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., Foz do Iguaçu, 1999. *Anais.* Foz do Iguaçu, 1999.

NOGAMI, M.; YAMAZAKI, T.; ABE, Y. Fluorescence properties of Eu^{+3} and Eu^{2+} in Al_2O_3-SiO_2 glass. *Journal of Luminescence*, Nagoya, v.78, p.63-68, 1998.

OKAMOTO, M. Relationship between the end-cap structure of polycarbonates and their impact resistance. *Polymer*, Chiba, v.42, p.8355-8359, 2001.

PAVLIK, B.L. *Tecnologia da ferragem para linhas de AT e EAT*. 1.ed. São Paulo, Gente, 1989, 329p.

PRATESI, G.; CaPITANI, D.; CIPRIANI, C.; GIULI, G.; ZIARELLI, F. A ^{29}Si-^{27}Al magic-angle spinning NMR study of natural silica glass from the Libyan Desert (Egypt). *Journal of Non-Crystalline Solids*, Firenze, v.279, p.88-92, 2001.

QUEZADA, V.A.C. & CALDAS, L.V.E. Glass detectors for dose determination in a flower irradiation process. *Radiat. Prot. Dosim.*, São Paulo, v.85, p.473-475, 1999.

RAMANI, R. & RANGANATHAIAH, C. Degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene and polycarbonate by UV irradiation. *Polymer Degradation and Stability*, Pune, v.69, p.347-354, 2000.

REZENDE, E.M. *Materiais usados em Eletrotécnica*. 1.ed. Rio de Janeiro, Interciência, 1977, 382p.

RODRIGUES JR., A.A. & CALDAS, L.V.E. Commercial plate windows glass tested as routine dosimeter at a gamma irradiation facility. *Radiation Physics and Chemistry*, São Paulo, v.63, p.765-767, 2002.

RUBIN, M. Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar Energy Materials*, Califórnia, v.12, p.275-288, 1985.

SANDERSON, K.D.; HURST, S.; McKITTRICK, T.; RIMMER, D.; YE, L. Photocatalytic and hydrophilic coatings for use as self-cleaning glass products. In: LATIN AMERICAN TECHNICAL SYMPOSIUM ON GLASS – SIMPROVI, 5., Campos do Jordão, 2003, s.n.t.

SARTORIUS. Density determination. In: Sartorius user's guide*. 1.ed., Goettingen, 2001, p.23.*

SETTLE, F. A. Infrared spectroscopy. In: *Handbook of instrumental techniques for analytical chemistry*. 1.ed., Nova Jersey, Prentice-Hall, 1997, p.247-376.

SHACKELFORD, J. Mechanical behavior. In: *Introduction to materials science for engineers*. 5.ed. Nova Jersey, Prentice-Hall, 1999, p.234.

SHENG, J.; KADONO, K. YAZAWA, T. Fading behavior of x-ray induced color centers in soda-lime silicate glass. *Applied Radiation and Isotopes*, Osaka, v.57, p.813-817, 2002.

SIMÕES, L..A.N. Distribuição de tensão em cadeias de isoladores. Campina Grande, 2003, 29p. (Relatório Final do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica PIBIC/CNPq/UFPB – Universidade Federal de Campina Grande/UFCG).

SUSZYNSKA, M. & MACALIK, B. Optical studies in gamma-irradiated commercial soda-lime silicate glasses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Wroclaw, v.179, p.383-388, 2001.

TAN, C.Z. Optical interference and refractive index of silica glass in the infrared absorption region. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Berlim, v.249, p.51-54, 1999.

TEIXEIRA, M.I. & CALDAS, L.V.E. Dosimetric properties of various colored commercial glasses. *Applied Radiation and Isotopes*, São Paulo, v.57, p.407-413, 2002.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E.M.S. *Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água*. 1.ed. Recife, Universitária, 1998, 67p.

UCHINO, T.; NAKAGUCHI, K.; NAGASHIMA, Y.; KONDO, T. Prediction of optical properties of commercial soda-lime silicate glasses containing iron. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Hyogo, v.261, p.72-78, 2000.

(XAVIER, G.J.V., DOML/CHESF, comunicação verbal, 2003).

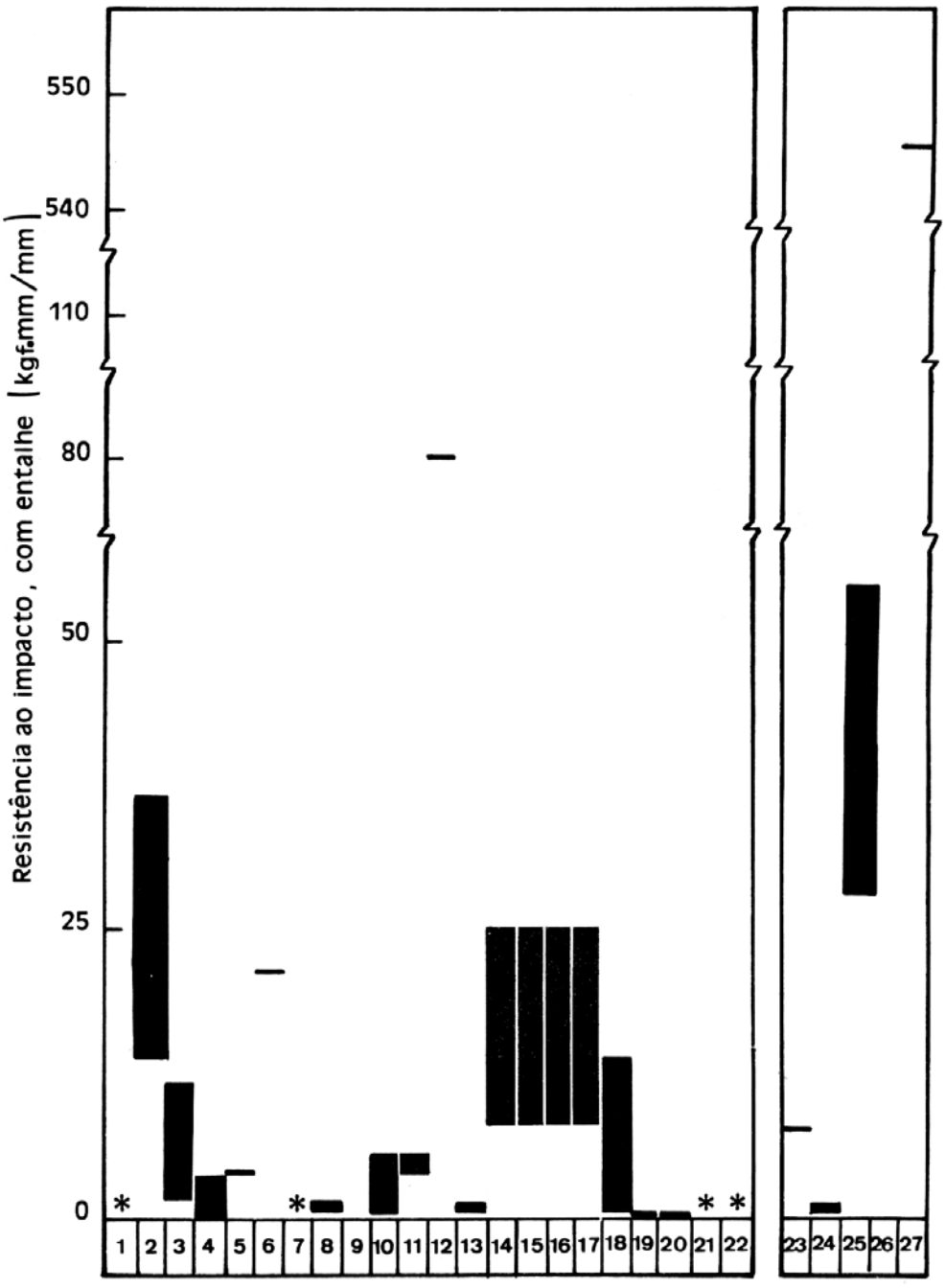
YANAGUIZAWA, J.A.; SHINOHARA, A.H.; SCHWARTZ, M.O.; XAVIER, G.J.V.; MACIEL, D.M. Estudo de absorção das radiações ultravioleta e infravermelha em blocos de vidro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 47., João Pessoa, 2003. *Anais*. João Pessoa, Associação Brasileira de Cerâmica, 2003, p.2048-2058.

ZHENG, Z.; HONGGUI, D.; DAOCHUAN, Y.; JIE, F. Window glass as a routine dosimeter for radiation processing. *Radiation Physics and Chemistry*, Jiangsu, v.31 (4-6), p. 419-423, 1988.

7. ANEXOS E APÊNDICES

(ANEXO 1)

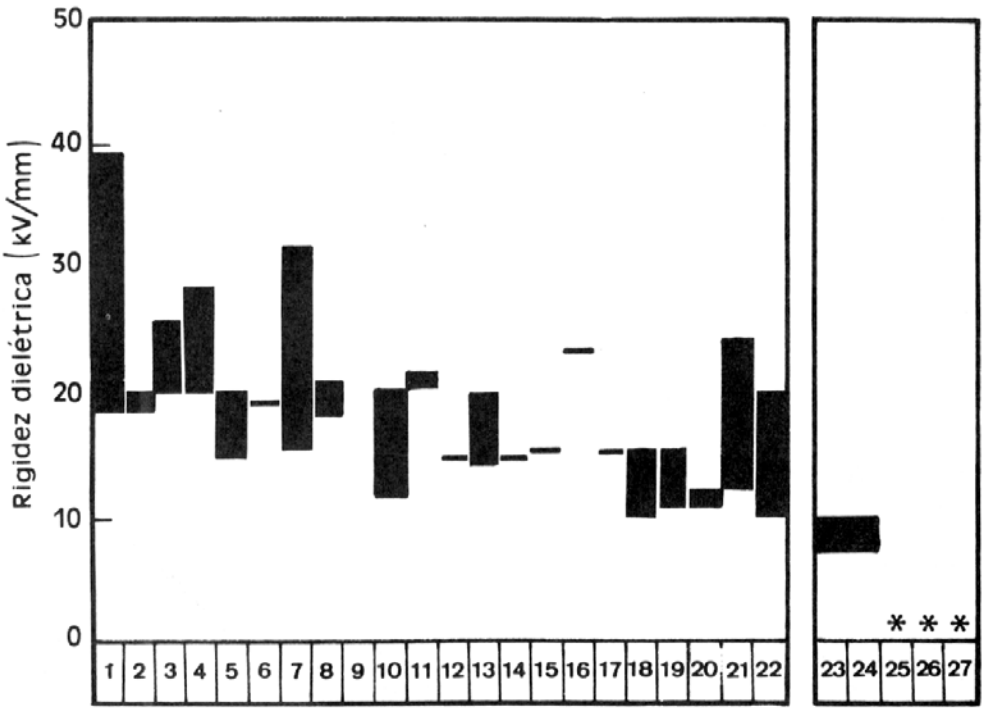
Resistência ao impacto de diversos materiais a 20–25°C (Mano, 1996).



* Não aplicável; não quebra nas considerações do ensaio.

(ANEXO 2)

Rigidez dielétrica de diversos materiais a 20–25°C (Mano, 1996).



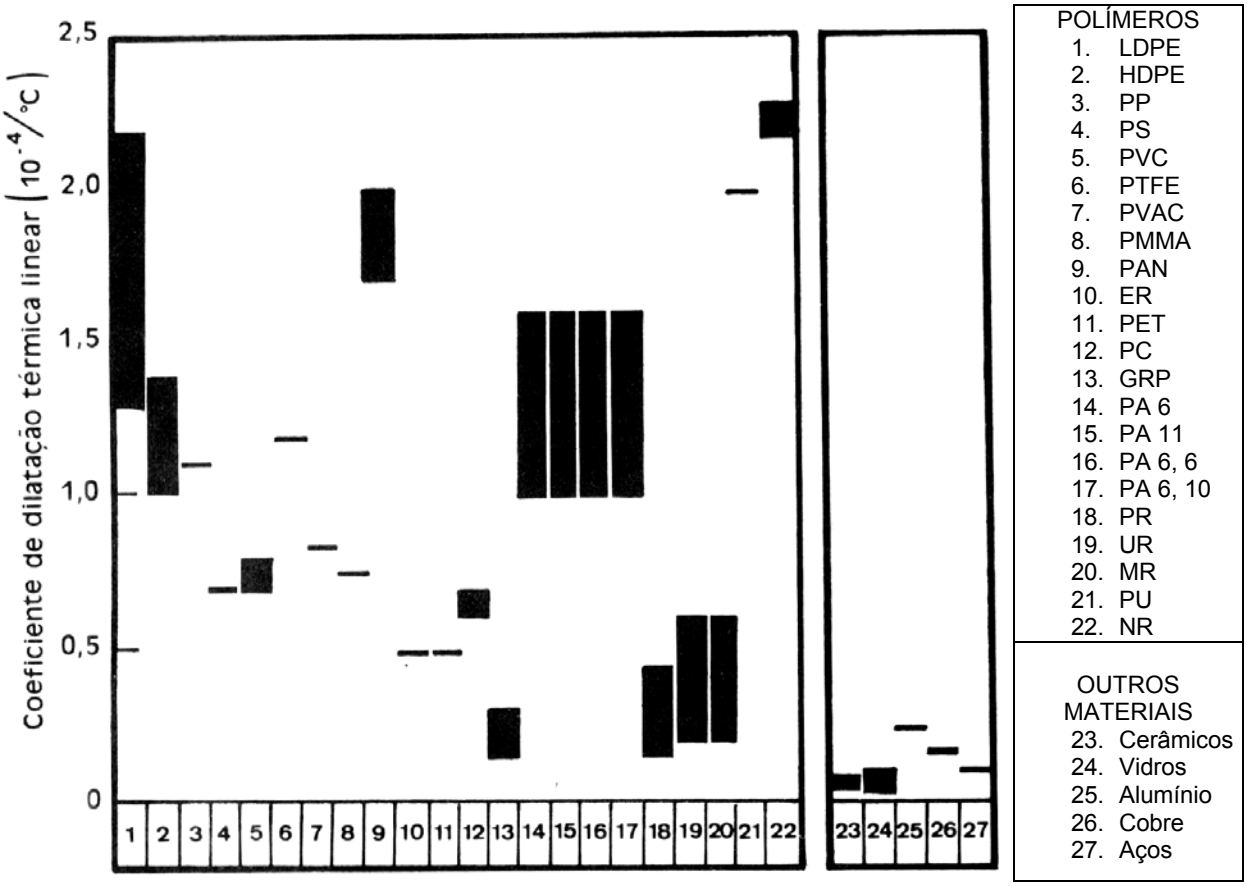
* Não aplicável.

POLÍMEROS
1. LDPE
2. HDPE
3. PP
4. PS
5. PVC
6. PTFE
7. PVAC
8. PMMA
9. PAN
10. ER
11. PET
12. PC
13. GRP
14. PA 6
15. PA 11
16. PA 6, 6
17. PA 6, 10
18. PR
19. UR
20. MR
21. PU
22. NR

OUTROS MATERIAIS
23. Cerâmicos
24. Vidros
25. Alumínio
26. Cobre
27. Aços

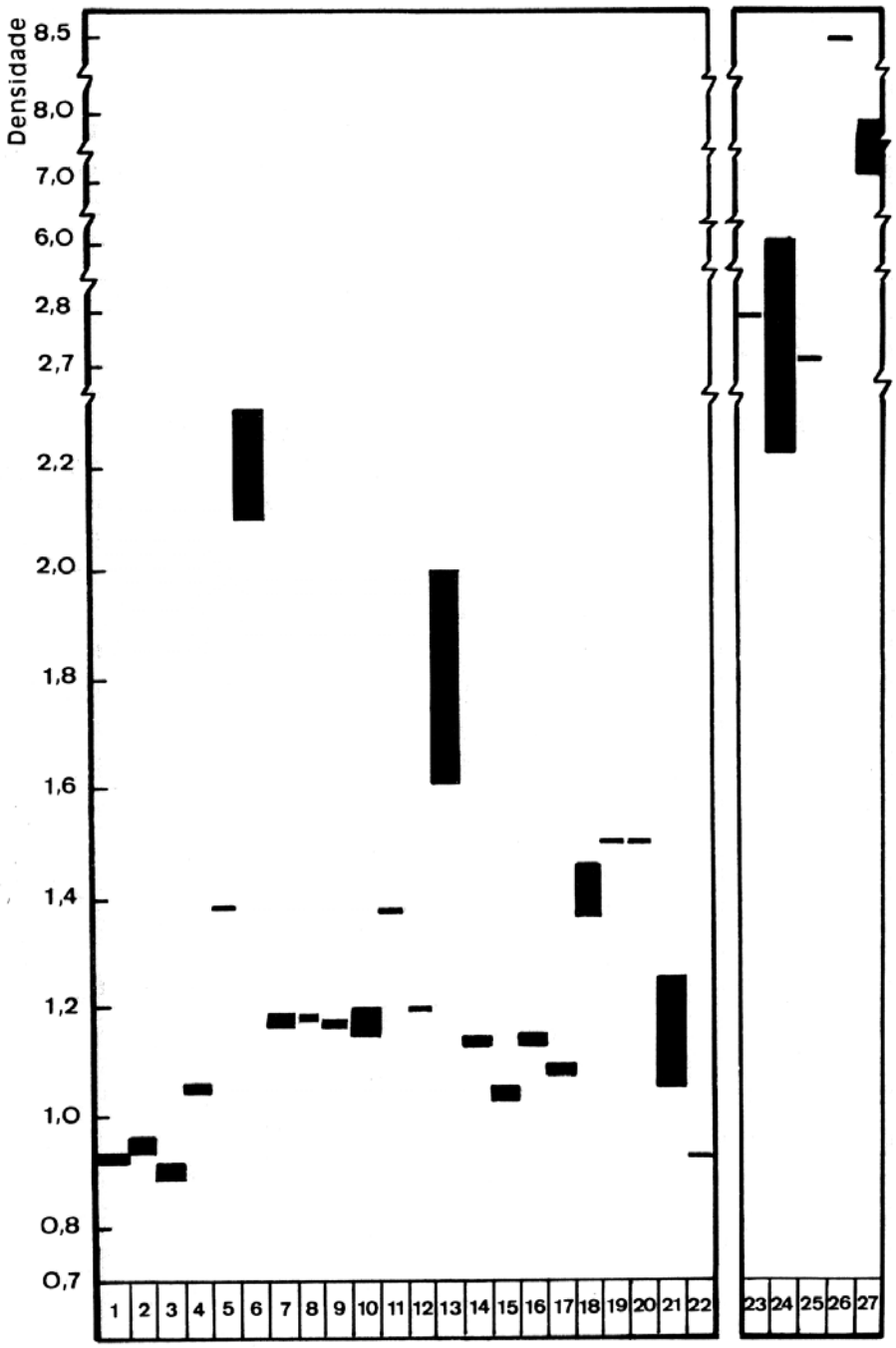
(ANEXO 3)

Coeficiente de dilatação térmica linear de diversos materiais a 20°C (Mano, 1996).



(ANEXO 4)

Densidade, em g/cm³, de diversos materiais a 20–25°C (Mano, 1996).

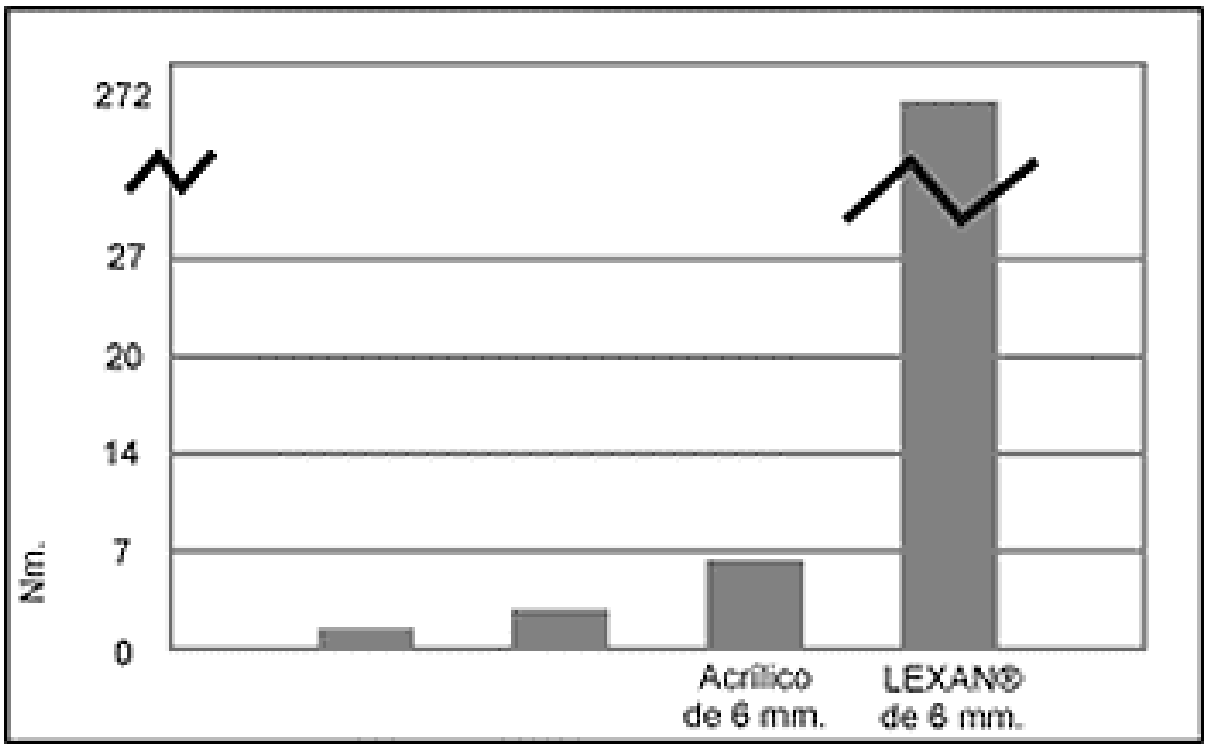


POLÍMEROS
1. LDPE
2. HDPE
3. PP
4. PS
5. PVC
6. PTFE
7. PVAC
8. PMMA
9. PAN
10. ER
11. PET
12. PC
13. GRP
14. PA 6
15. PA 11
16. PA 6, 6
17. PA 6, 10
18. PR
19. UR
20. MR
21. PU
22. NR

OUTROS MATERIAIS
23. Cerâmicos
24. Vidros
25. Alumínio
26. Cobre
27. Aços

(ANEXO 5)

Resistência ao impacto do policarbonato (LEXAN®) comparada ao acrílico (Dardo de aço com ponta de 25,4 mm de diâmetro) (Day Brasil, 2003).



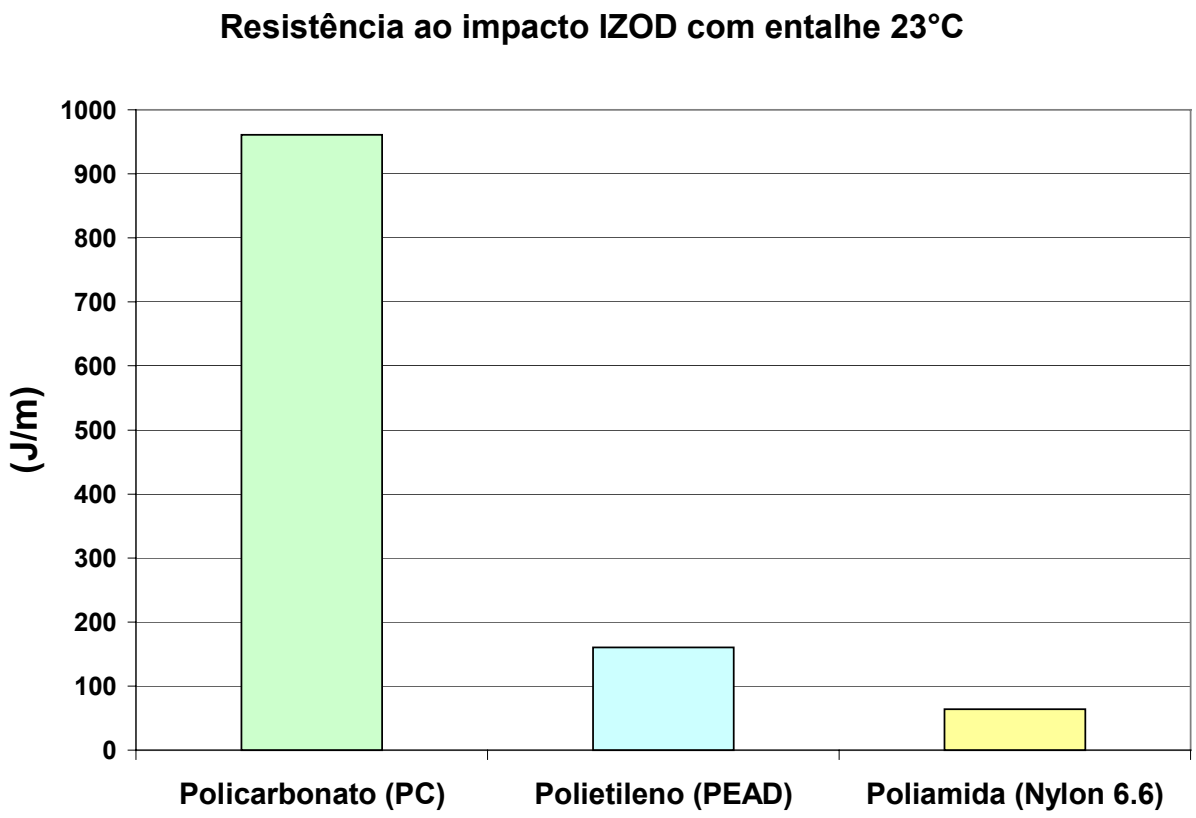
(APÊNDICE 1)

Propriedades dos materiais candidatos ao escudo polimérico.

Função \ Material		Policarbonato (PC)	Nylon 6.6 (Poliamida, PA)	Polietileno de alta densidade (PEAD)
		Termoplástico de engenharia	Termoplástico de engenharia	Termoplástico de engenharia
A) Propriedades mecânicas	Resistência ao impacto (J/m)	961	64	27 a 160
B) Propriedades dielétricas	Rigidez dielétrica (kV/mm)	17	30	16 a 24
C) Poder extintor de fogo	Flamabilidade	Auto-extinguível	Auto-extinguível	Não
D) Propriedades térmicas	Coeficiente dilatação térmica linear (10^{-5} mm/ mm/ °C)	6,84	8,1	10 a 20
	Temperatura de fusão (°C)	221	130 a 137	255
	Temperatura de trabalho (°C)	-40 a 120	-40 a 120	-200 a 96
E) Durabilidade	Resistência UV	Boa resistência ao UV	Sofre ataque do ultravioleta e ozônio	Sofre ação de raios UV e ozônio
	Absorção de água em 24 horas, 3 mm espessura (%)	0,15	$2,8 \pm 0,3$	< 0,01
F) Densidade (g/cm³)		1,2	1,14	0,941 a 0,965
G) Preço de compra* (R$/m²), chapa de 6mm de espessura		300,00	270,00	120,00
H) Fornecedor mais próximo de Recife –PE		São Paulo	Recife	Recife
I) Usinabilidade, processabilidade		Pode ser perfurado, serrado, torneado, moldado, prensado, limado, lixado e polido.	Facilidade de usinagem, porém não moldável	Facilmente usinável. soldável, moldável, estampável.
J) Impacto ambiental		Não	Não	Não
K) Estética	Cor	Incolor	Branco leitoso	Branco leitoso

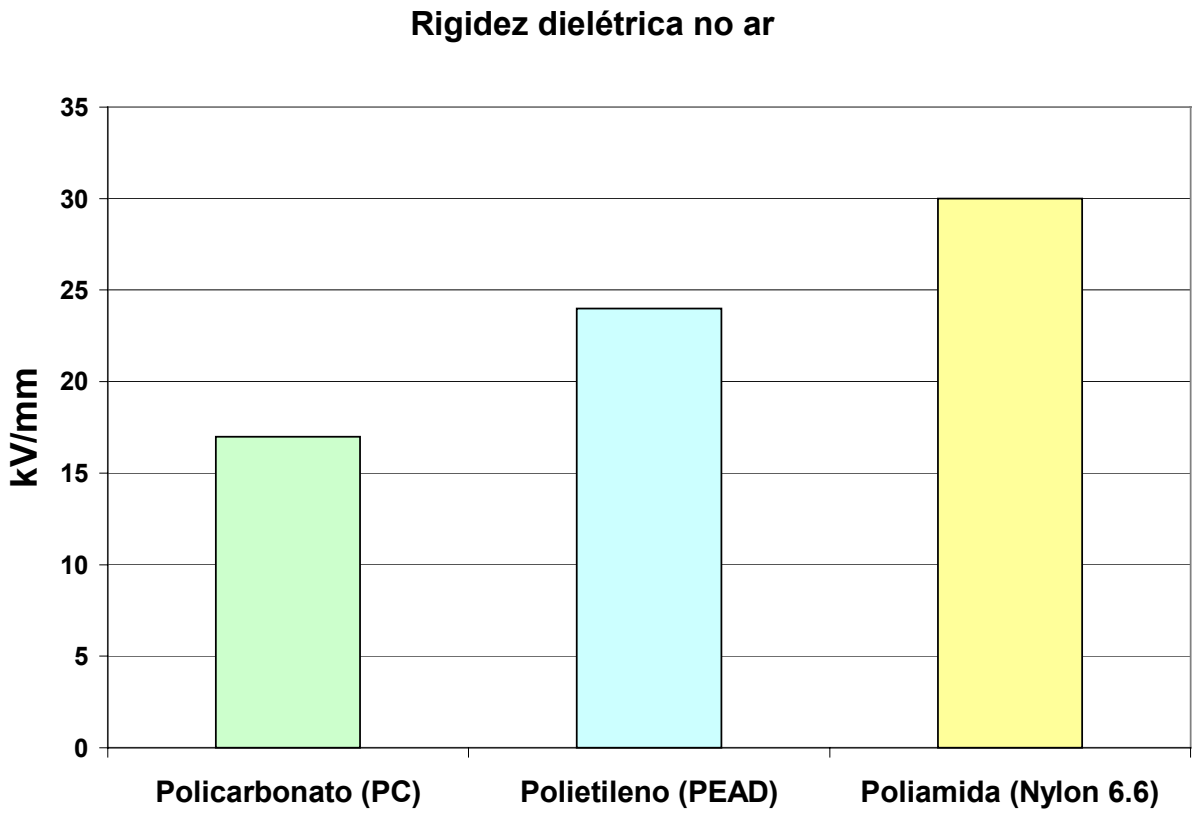
(*) Considerando despesas com transporte para Recife.
(Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).

(APÊNDICE 2)



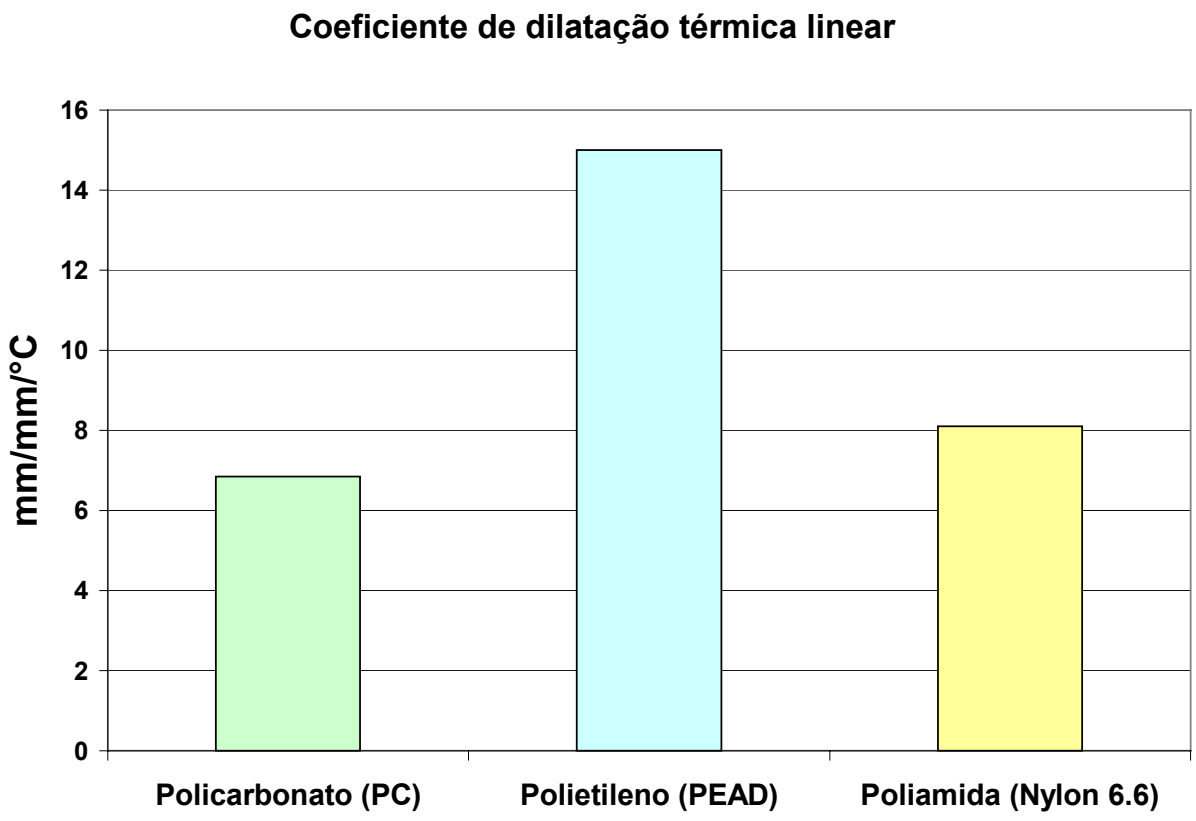
Fonte: (Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).

(APÊNDICE 3)



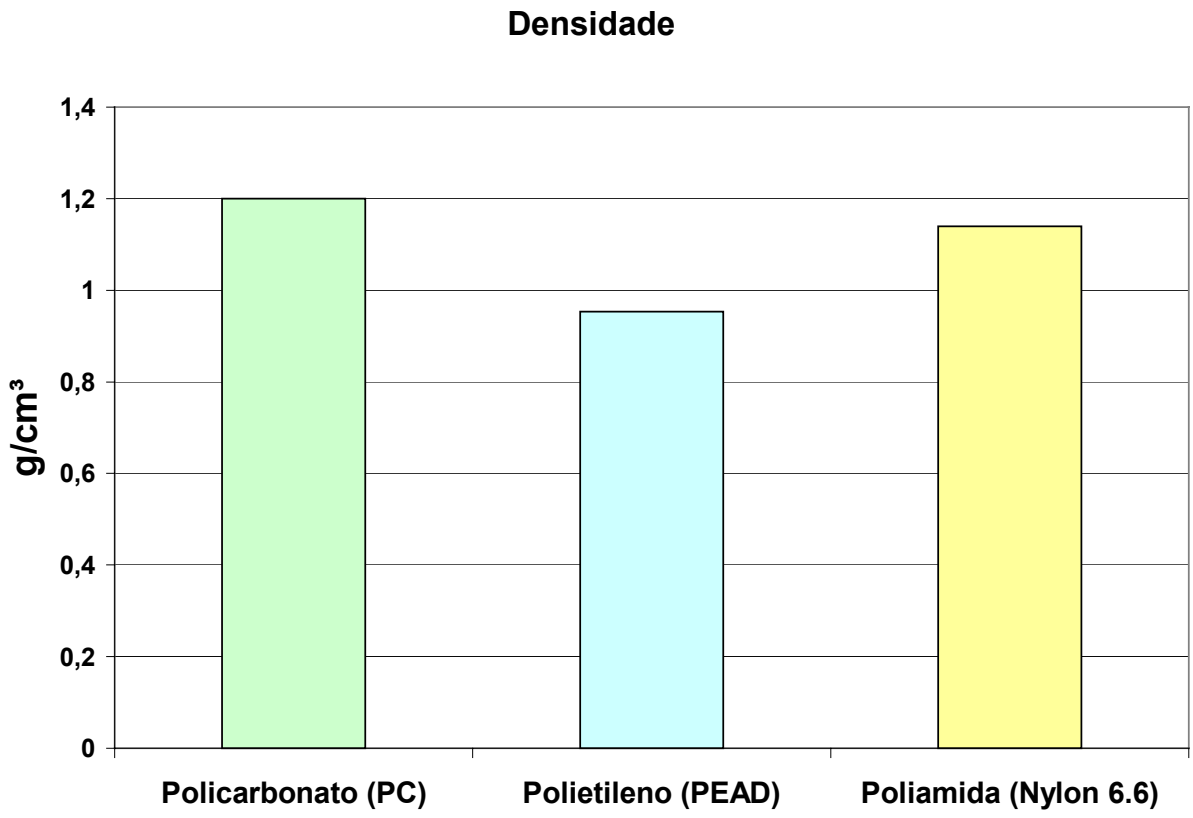
Fonte: (Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).

(APÊNDICE 4)



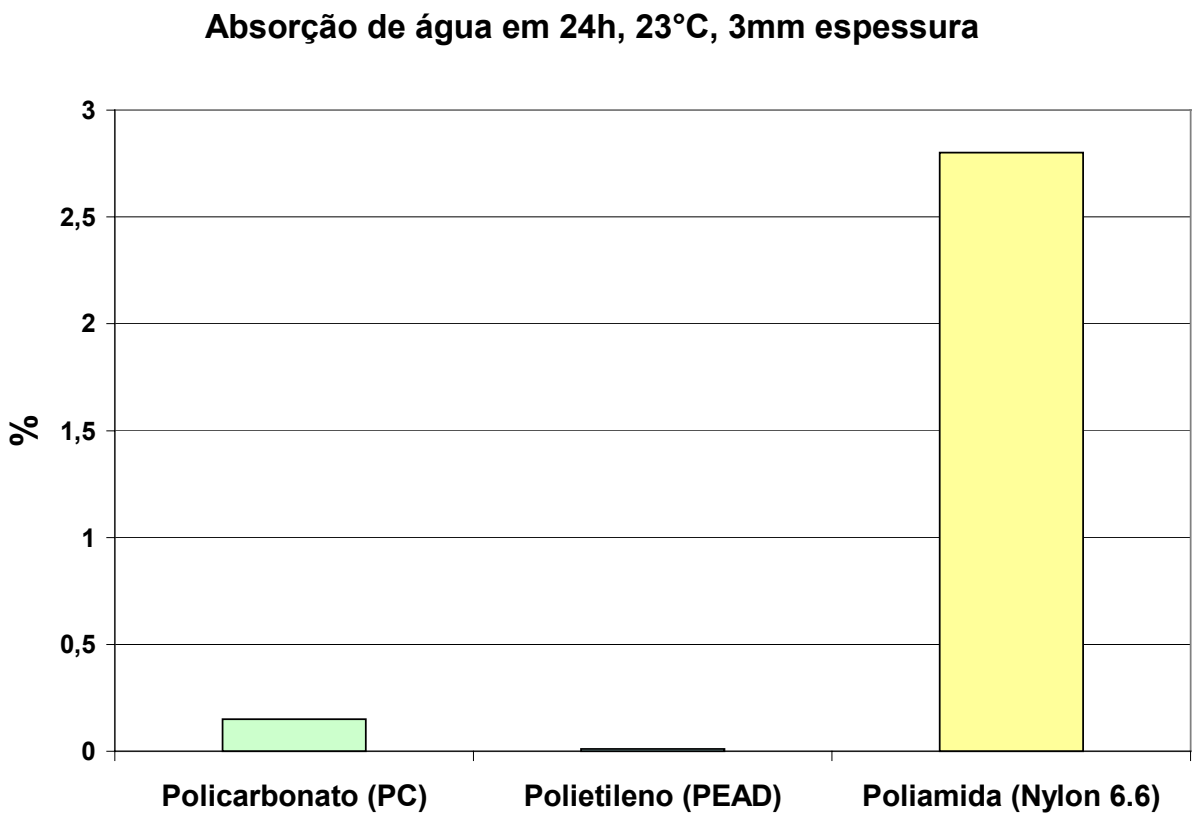
Fonte: (Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).

(APÊNDICE 5)



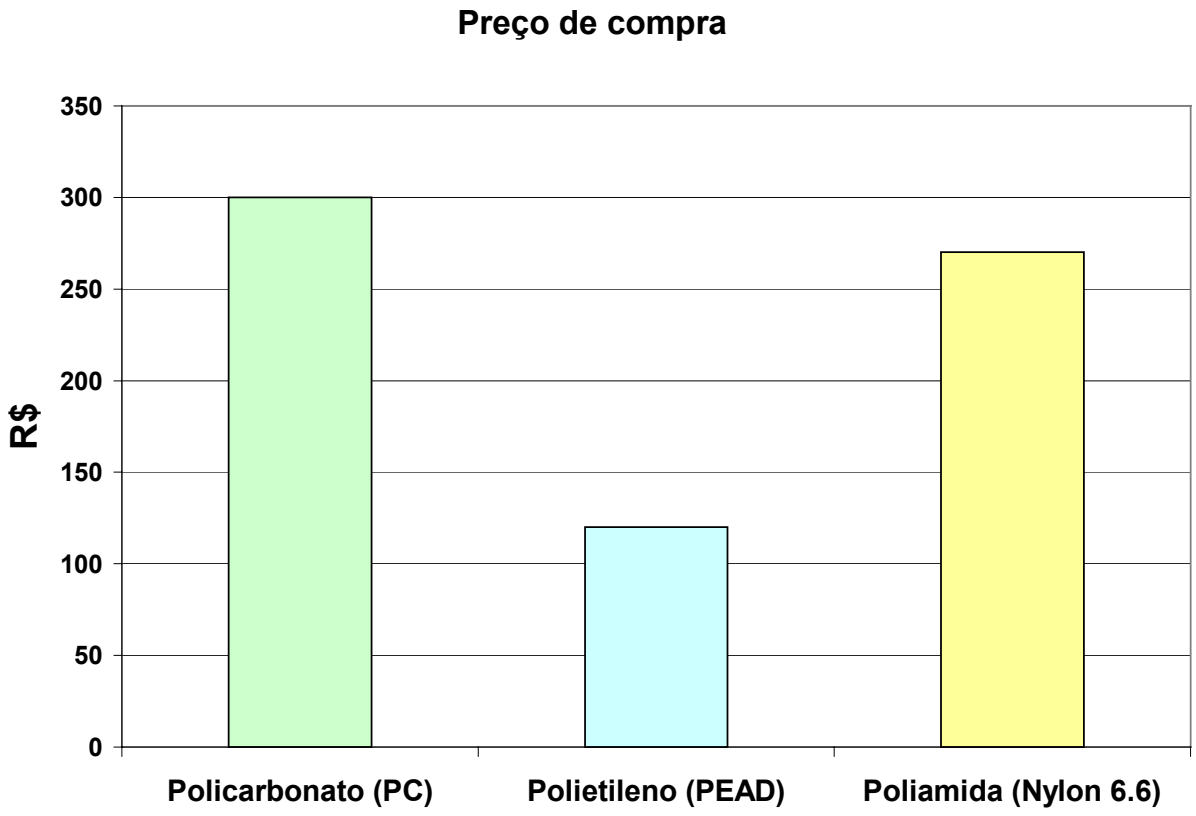
Fonte: (Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).

(APÊNDICE 6)



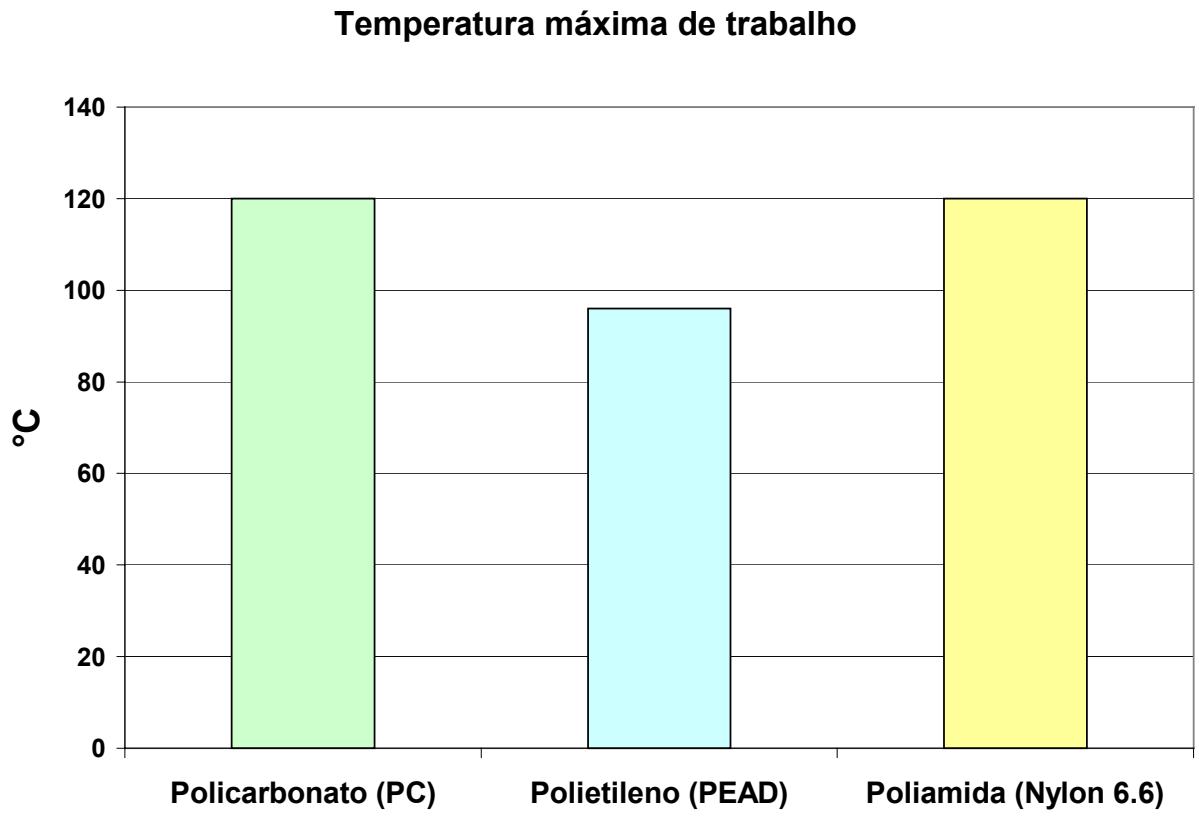
Fonte: (Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).

(APÊNDICE 7)



Fonte: (Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).

(APÊNDICE 8)



Fonte: (Brandrup *et al.*, 1999; Albuquerque, 1999).