

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

JULIANA DE ALMEIDA YANAGUIZAWA DE CARVALHO

**BLINDAGEM BALÍSTICA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO CONTRA O
VANDALISMO E PROTEÇÃO UV PARA CADEIAS DE ISOLADORES DE VIDRO
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

RECIFE

MARÇO – 2008

JULIANA DE ALMEIDA YANAGUIZAWA DE CARVALHO

**BLINDAGEM BALÍSTICA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO CONTRA O
VANDALISMO E PROTEÇÃO UV PARA CADEIAS DE ISOLADORES DE VIDRO
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação.

ORIENTADOR: PROF. DR. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA

RECIFE

MARÇO – 2008

C331b Carvalho, Juliana de Almeida Yanaguizawa de.

Blindagem balística de compósito polimérico contra o vandalismo e proteção UV para cadeias de isoladores de vidro em linhas de transmissão / Juliana de Almeida Yanaguizawa de Carvalho. – Recife: O Autor, 2008.

128 f.; il., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. EN. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2008.

Inclui Bibliografia e Apêndice.

1. Dosimetria e Instrumentação Nuclear. 2. Isolador de vidro – Linhas de transmissão. 3. Compósito epóxi-vidro – Ensaio balístico. I. Título.

612.01448 CDD (22.ed.)

UFPE/BCTG/2008-054

**BLINDAGEM BALÍSTICA DE COMPÓSITO POLIMÉRICO CONTRA
O VANDALISMO E PROTEÇÃO UV PARA CADEIAS DE
ISOLADORES DE VIDRO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Juliana de Almeida Yanaguizawa de Carvalho

APROVADA EM: 24.03.2008

ORIENTADOR: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara – DEMEC/UFPE


Profa. Dra. Helen Jamil Khoury – DEN/UFPE


Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino – DEESP/UFPE


Prof. Dr. Carlos Kenichi Suzuki – FEM/UNICAMP


Prof. Dr. Cezar Henrique Gonzalez – DEMEC/UFPE

Visto e permitida a impressão


Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

A minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao término das atividades do doutorado, agradeço aqueles que de alguma forma me apoiaram na concretização deste trabalho.

Ao orientador Prof. Armando Shinohara, pela sua orientação e oportunidade de participar dos projetos de pesquisa no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da UFPE.

Ao Departamento de Energia Nuclear da UFPE, CNPq e CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado, em particular ao Prof. Carlos Brayner e Prof. André Netto.

Aos professores do comitê de acompanhamento da tese, que muito contribuíram com sugestões e críticas, engrandecendo este trabalho.

À Prof^a Helen Khoury, pela gentileza em disponibilizar o densitômetro digital e o leitor de dosímetro termoluminescente, do Laboratório de Dosimetria e Instrumentação (DEN-UFPE). Aos colegas Álvaro Carvalho e Henry Sullasi, pela ajuda nas medições.

Ao Prof. Carlos Suzuki e equipe técnica, Claudinete e Rita, da Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP-SP), pelas medidas de fluorescência de raios-X e análise térmica TGA-DSC.

Ao Instituto de Física “Gleb Wataghin” (UNICAMP-SP) pela permissão em utilizar o espectrofotômetro de UV-VIS-NIR.

Ao Dr. Manfred Schwartz, por disponibilizar o espectrofotômetro de UV-Vis na Central Analítica do Depto. de Química Fundamental (UFPE).

Ao Tenente Coronel da Força Aérea e instrutor de tiros Sr. Teruo Anabuki, pela condução do ensaio balístico.

À CHESF, pelo apoio ao projeto de tese, em particular Eng. Denis Maciel, Eng. Flávio Castelo Branco, Eng. Gustavo Xavier e Eng. Osveraldo Vilar.

À EMBRARAD em Cotia-SP, pela irradiação das amostras de vidro.

Ao Eng. Leo Ossanai da TECSIS em Sorocaba-SP, por fornecer as amostras de compósito epóxi-vidro.

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE- USP), por disponibilizar os equipamentos para os ensaios de alta-tensão.

Aos amigos Arthur, Cidrack, Danilo, Flávia, Fusae, Luis, Max, Patrícia, Pietro e Rodrigo, pela amizade e ajuda que me prestaram no laboratório do DEMEC (UFPE).

A todos que direta ou indiretamente estiveram presentes no processo de elaboração desta tese.

Aos meus familiares de Pernambuco e São Paulo, pelo carinho, atenção e estímulo.

Aos meus pais e irmã que, mesmo longe, torcem por mim; obrigada pelo apoio e amor em todos os momentos de minha vida.

Ao meu esposo Eudes, pelo companheirismo, amor e incentivo que sempre me dá.

Acima de tudo, agradeço a Deus pelas bênçãos alcançadas em meus estudos.

“Disse Daniel: Seja bendito o nome de Deus para todo o sempre, porque são Dele a sabedoria e a força. Ele muda os tempos e as estações; Ele remove os reis e estabelece os reis; é Ele quem dá a sabedoria aos sábios e o entendimento aos entendidos. Ele revela o profundo e o escondido; conhece o que está em trevas, e com Ele mora a luz.”

Dn 2:20-22.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi induzir a absorção UV de vidros soda-cal sílica por irradiação gama, bem como avaliar as propriedades mecânicas, elétricas e a microestrutura do policarbonato (PC), com e sem tratamento térmico, e do compósito epóxi-vidro, com a finalidade de se obter um protótipo para linhas de transmissão composto por uma cadeia de isoladores de vidro absorvedor de radiação UV solar e escudos balísticos contra a quebra da parte vítrea por vandalismo. Vidros soda-cal sílica foram irradiados com fonte de ^{60}Co em doses de 0,5 kGy a 50 kGy e apresentaram um aumento substancial na absorção UV: o comprimento de onda de corte (*cut-off*) passou de 295 nm para valores acima de 600 nm, dependendo da dose de irradiação. Notou-se a instabilidade dos centros de cor induzidos pela irradiação gama acima de 10 kGy, em temperatura ambiente, através de medidas de densidade óptica relativa e alterações nos espectros UV-Vis monitoradas por cerca de um ano e dois meses. A estabilização dos centros de cores induzidos ocorreu em torno de 40 dias após a irradiação. Ensaio de alta tensão numa cadeia com dezesseis isoladores de vidro, sendo nove quebrados (condição de isolamento mínimo) em diferentes arranjos, mostraram que a colocação de escudos de PC não prejudicou o desempenho elétrico da cadeia. Ademais, a distribuição uniforme dos isoladores inteiros ao longo da cadeia foi responsável pelo maior valor de tensão disruptiva. Propriedades mecânicas do PC e compósito epóxi-vidro foram avaliadas por ensaios de tração, impacto Charpy e medidas de microdureza. A análise termogravimétrica mostrou que até 300°C não houve perda de massa no compósito e PC; foi obtida uma correlação linear positiva entre a temperatura de transição vítrea e a rigidez dielétrica desses materiais. No entanto, o tratamento térmico do PC até 180°C no forno elétrico, acima da temperatura de transição vítrea, ocasionou a formação de bolhas no interior

das amostras, indicando um estágio de degradação do material caracterizado por maior microdureza, menor rigidez dielétrica e fragilização do polímero em relação ao PC íntegro. Um dispositivo de impacto foi desenvolvido especialmente para simular o impacto de projéteis de armas de fogo em laboratório e avaliar a resistência ao impacto de isoladores de vidro e escudos balísticos. No ensaio balístico com munições e armas diversas, incluindo carabina Puma 38, o material compósito epóxi-vidro na espessura de 10 mm protegeu todos os isoladores de vidro em cadeia – um desempenho não obtido com o PC de 12 mm.

Palavras-chave: Isolador de vidro. Linhas de transmissão. Policarbonato. Ensaio balístico. Compósito epóxi-vidro. Degradação. Vandalismo.

ABSTRACT

The aim of this study was to induce the UV absorption of soda-lime silica glasses by gamma irradiation, as well as to select and evaluate the mechanical and electrical properties and also the microstructure of the polycarbonate (PC), with and without heat treatment, and the glass fiber reinforced epoxy composite, to make a prototype for transmission lines composed by a chain of glass insulators, which block the solar UV, and ballistic armor to protect the glass part from the vandalism actions. The soda-lime silica glasses were irradiated by radiation from ^{60}Co source with different doses. As a result, irradiated samples presented a substantial absorption of UV rays as a function of dose and the cut-off changed from 295 nm to above of 600 nm. However, an abrupt change of UV absorption was observed in samples irradiated with dose above 10 kGy after couple of days of fading. The high voltage testing to evaluate the electrical breakdown voltage in a chain with sixteen glass insulators, with nine broken units - adopted as minimum insulation condition to safe maintenance - showed that the use of PC armor in the chain did not affect the insulation performance. Furthermore, an uniform distribution of good insulators along of the chain was responsible for the higher electrical breakdown voltage values. Tension, Charpy impact and microhardness testings were employed to evaluate the mechanical properties of the PC and glass fiber-epoxy composite samples. From thermogravimetry, there was no evidence of mass loss up to 300°C for the PC and for the composite materials. A linear correlation was obtained between glass transition temperature and dielectric strength values. However, after the heat treatment of the PC at 180°C in a furnace, which corresponds to a temperature above the glass transition temperature, many bubbles were formed in the PC samples. The electrical, microhardness and Charpy impact testings of PC samples with bubbles exhibited,

respectively, lower dielectric strength, higher hardness and lower impact energy, indicating a fragile behavior when compared to as received PC. Previous to ballistic testing, an impact testing equipment was specially developed to evaluate the impact strength of glass insulators and ballistic armors. From the ballistic testing with various projectiles types and guns, the glass fiber reinforced epoxy composite of 10 mm in thickness protected all the glass insulators in the chain; such performance was not obtained with the PC material of 12 mm in thickness.

Keywords: Glass insulator. Transmission lines. Polycarbonate. Ballistic. Glass fiber reinforced epoxy composite. Damage.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Isoladores de vidro de LT's	16
2.2	Propriedades ópticas do vidro soda-cal	23
2.3	Materiais do escudo balístico	27
2.3.1	O policarbonato	27
2.3.2	O compósito epóxi-vidro	29
2.4	Avaliação das propriedades mecânicas do escudo balístico	33
2.4.1	Ensaio balísticos	33
2.4.2	Ensaio de tração	35
2.4.3	Ensaio de impacto	38
2.4.4	Ensaio de microdureza	39
2.5	Avaliação das propriedades elétricas do escudo balístico	40
2.5.1	Rigidez dielétrica em sólidos	40
2.5.2	Árvores elétricas e arborescências em água	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Materiais e preparação de amostras	46
3.1.1	Vidros soda-cal	46
3.1.2	Critérios para seleção dos materiais do escudo balístico	46
3.1.3	Compósito epóxi-vidro	47
3.1.4	Policarbonato	48
3.2	Ensaio elétricos	48
3.2.1	Rigidez dielétrica	48
3.2.2	Ensaio de alta tensão	49
3.3	Ensaio mecânicos	52
3.3.1	Ensaio de tração	52
3.3.2	Ensaio de impacto Charpy	52
3.3.3	Ensaio de microdureza	53
3.3.4	Ensaio de impacto em isoladores de vidro e escudo balístico	53
3.4	Ensaio balístico	55
3.5	Ensaio de radiografia computadorizada no compósito epóxi-vidro	56
3.6	Medidas de densidade	57
3.7	Irradiação gama	58
3.10	Análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial	58
3.11	Microscopia óptica	59
3.12	Difração de raios-X	59
3.13	Fluorescência de raios-X	60
3.14	Espectroscopia de ultravioleta-visível e infravermelho	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61

4.1 Tratamento térmico do PC	61
4.2 Ensaaios elétricos	62
4.2.1 Rigidez dielétrica e caracterização da homogeneidade do material	62
4.2.2 Ensaio de alta tensão	65
4.3 Ensaaios mecânicos	69
4.3.1 Ensaio de tração	69
4.3.2 Ensaio de impacto Charpy	72
4.3.3 Ensaio de microdureza	74
4.3.4 Ensaio de impacto com pêndulo em prensa hidráulica	76
4.4 Ensaio balístico	77
4.5 Ensaio de radiografia computadorizada	84
4.6 Caracterização dos materiais do escudo balístico	85
4.6.1 Medidas de densidade	85
4.6.2 Análise química por fluorescência de raios-X	86
4.6.3 Difração de raios-X	87
4.6.4 Espectroscopia de ultravioleta-visível e infravermelho	88
4.6.5 Análise térmica	91
4.6.6 Considerações sobre a formação de bolhas no PC aquecido a 180°C	94
4.7 Variação da transmitância no UV-Vis do vidro soda-cal irradiado	97
4.7.1 Análise química por fluorescência de raios-X e medidas de densidade	97
4.7.2 Densidade óptica e espectroscopia de ultravioleta-visível	98
4.7.3 Espectroscopia de infravermelho	104
4.7.4. Efeito da temperatura na transmitância dos raios UV	105
4.8 Obtenção do protótipo	107
4.8.1. Determinação do valor econômico do produto	108
5 CONCLUSÕES	110
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
7 TRABALHOS PUBLICADOS	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÊNDICES	124
ANEXOS	126

1 INTRODUÇÃO

Os isoladores de vidro são componentes das linhas de transmissão (LT's) de energia elétrica, responsáveis pelo isolamento elétrico entre a linha (fase) e a torre metálica de sustentação (terra), como também pelo sustento mecânico dos cabos aéreos de transporte de energia em alturas que podem ultrapassar 15 metros.

Segundo a COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (2001, 2007), CHESF, no período de 1988 a 2001 ocorreram 339 desligamentos em suas LT's, dos quais 75% foram originados por vandalismo. Entre 1997 e 2006 foram registradas 81 falhas permanentes nas LT's da CHESF causadas pelo vandalismo – sendo 19 falhas nas linhas de 138kV, 58 falhas nas linhas de 230 kV e 4 falhas nas linhas de 500 kV.

Em geral, a danificação por vandalismo nas cadeias de isoladores de vidro é causada por projéteis de armas de fogo. Uma vez quebrados os isoladores, diminui-se o isolamento elétrico da cadeia e, conseqüentemente, aumentam-se as chances de ocorrência de descargas elétricas e com isso existe o risco de desligamento automático da linha. Em alguns casos, mesmo após a depredação dos isoladores de vidro, a LT permanece operando e, dependendo das condições atmosféricas e do número de unidades íntegras remanescentes, a equipe de manutenção avalia se a intervenção para trocar as peças quebradas poderá ser feita com a linha energizada ou se necessita fazer o desligamento intencional.

As interrupções no fornecimento de energia elétrica devido ao vandalismo originam prejuízos aos consumidores e à própria CHESF que, além de arcar com os custos de manutenção, é penalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com multas cobradas em função do tempo em que a linha permanece inoperante. O vandalismo também causa risco à população local, pois as cadeias alvejadas pelos vândalos podem romper-se e

derrubar os cabos de energia. Ainda, existe o risco aos eletricitistas de ocorrência de descarga elétrica durante o trabalho de substituição das peças danificadas quando a intervenção é realizada com a linha viva (energizada).

Em fevereiro de 2007 um desligamento automático na LT de 230 kV Tucuruí-Altamira da Eletronorte foi provocado por vândalos, que conseguiram quebrar 11 isoladores de vidro de uma cadeia composta por 16 unidades, causando a interrupção na transmissão de energia para as subestações do Pará. Doze municípios (cerca de 60 mil domicílios) ficaram sem energia elétrica durante 10 horas. No município de São Félix do Xingu, também no Pará, a quebra de isoladores de vidro da LT Tucumã-São Félix, em abril de 2007, causou a interrupção do fornecimento de energia por 6 horas (CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE, 2007; DIÁRIO DO PARÁ, 2007; ELETROSUL, 2007). Outros casos de vandalismo em LT's encontram-se na seção dos Anexos.

Hoje, a maioria dos isoladores instalados no Brasil é de vidro. Só a CHESF possui cerca de 18 mil quilômetros de LT's e mais de 3 milhões de isoladores de vidro instalados, que correspondem a 80% do total de isoladores utilizados pela empresa (COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO, 2007). Embora seja crescente o uso de isoladores compósitos em todo o mundo, estes produtos têm apresentado falha por fratura frágil com pouco tempo de operação e, apesar dos mecanismos de ruptura serem bastante conhecidos, não há solução definitiva para o problema até o momento.

Diante disso, torna-se interessante utilizar um protetor balístico que mantenha a integridade estrutural dos isoladores de vidro durante sua vida útil e que apresente um desempenho elétrico satisfatório, isto é, não interfira na tensão disruptiva do sistema.

Nesse aspecto, é sabido que o policarbonato (PC) é um termoplástico de engenharia de elevada resistência ao impacto e boas propriedades dielétricas. Também, fibras têm sido usadas desde a década de 1970 no reforço de polímeros, dando origem aos

compósitos poliméricos, considerados excelentes materiais de engenharia. Atualmente, os compósitos de matriz epóxi com reforço de fibras de vidro têm se destacado por encontrarem aplicação em diversos segmentos industriais, como aeronáutico, eólico, marítimo, elétrico, bélico e nuclear.

Entretanto, em virtude da degradação por exposição aos raios solares a que os polímeros estão submetidos, é desejável que um escudo balístico de material polimérico seja protegido contra o ataque da radiação UV.

Na literatura é conhecido que certos tipos de vidros quando irradiados com raios gama podem ter suas propriedades ópticas alteradas pela indução de centros de cor, resultando em um aumento na absorção UV. Assim, a degradação UV sobre um escudo balístico polimérico poderia ser minimizada com a utilização de um isolador de vidro absorvedor de raios UV, ao mesmo tempo em que o vidro estaria protegido pelo escudo contra o vandalismo, numa relação tida como “simbiótica”.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi induzir a absorção UV do vidro soda-cal por irradiação gama, como também avaliar as propriedades mecânicas, elétricas e a microestrutura do PC, com e sem tratamento térmico, e do compósito epóxi-vidro, com a finalidade de se obter um protótipo para LT's composto por uma cadeia de isoladores de vidro absorvedor de radiação UV solar e escudos balísticos contra a quebra da parte vítrea por vandalismo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Isoladores de vidro de LT's

As LT's operam em tensões acima de 69 kV. Para linhas de 230 kV uma cadeia (penca) é composta por 16 isoladores de vidro.

Os isoladores de vidro têm uma longa tradição no Brasil e possuem vida útil acima de 40 anos. A Figura 1 mostra isoladores de vidro típicos de linhas de 230kV, e suas principais propriedades estão apresentadas na Tabela 1.



Figura 1. Fotografia de isoladores de vidro tipo suspensão, modelo concha-bola, comuns em LT's de 230 kV. (SANTA TEREZINHA, 2007).

Tabela 1. Principais características técnicas de um isolador de vidro para cadeias de suspensão, modelo concha-bola.

Classificação conforme norma ANSI C29.2	---
Classificação conforme norma IEC 60305	U120BS
Classificação conforme norma NBR 7109	D120-16
Carga eletromecânica de ruptura	12.000daN
Distância de escoamento	320mm
Carga mecânica de tração	80000 N
Tração de rotina	40000 N
Diâmetro nominal D	254 mm
Passo P	146 mm
Peso líquido por peça	3,8 kg
Tensão disruptiva em frequência industrial a seco	80 kV
Tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva	50 kV

(REZENDE, 1977; SANTA TEREZINHA, 2007).

O vidro do isolador é do tipo soda-cal sílica (*soda-lime silica glass*), comumente chamado de vidro de janela ou *window glass*, tendo como ingredientes majoritários os óxidos SiO_2 (71-73%), Na_2O (12-14%) e CaO (10-12%). Os óxidos de sódio e cálcio são adicionados para diminuir o ponto de fusão do vidro e cerca de 1–4% de MgO é adicionado para prevenir a devitrificação, enquanto que 0,5–1,5% de Al_2O_3 é usado para aumentar sua durabilidade (KOWAL et al., 2000; ALVES et al., 2001; SUSZYNSKA; MACALIK, 2001; SHENG et al., 2002).

Pelo fato de ser temperado, o vidro do isolador oferece maior resistência mecânica em relação a um vidro laminado. Quando quebrado, estilhaça-se por completo, facilitando a identificação das unidades danificadas durante a inspeção visual das linhas energizadas. Conforme ilustrado na Figura 2, um isolador de vidro típico de LT's possui:

- a) uma campânula de ferro nodular zincado a quente, provida com engate tipo concha-bola, complementada com cupilha de bloqueio (de bronze, latão ou aço inoxidável);
- b) corpo (chamado de disco ou saia) de vidro temperado;
- c) pino metálico (do tipo bola) de aço forjado zincado;
- d) argamassa de cimento (Portland ou cimento aluminizado) para chumbar a campânula e o pino metálico ao corpo de vidro.

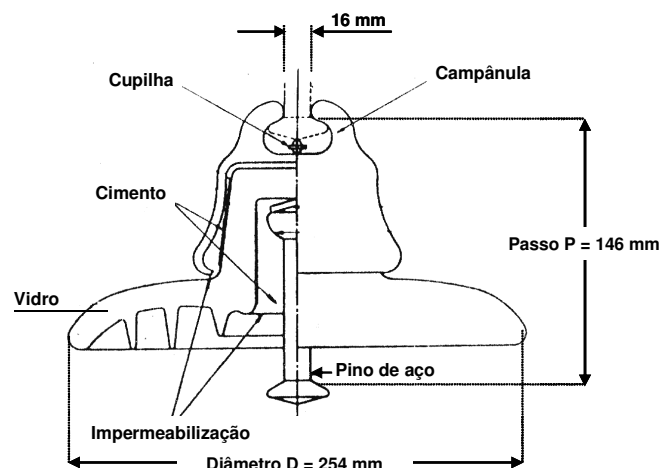


Figura 2. Esquema dos componentes de um isolador de vidro de suspensão, modelo concha-bola. (PAVLIK, 1989).

Para a formação do corpo, o vidro é prensado em estado pastoso, em moldes metálicos, na temperatura de 1200 °C aproximadamente, normalizado a 700°C e temperado com brusco resfriamento. Antes de serem chumbadas ao corpo do vidro, as campânulas têm sua base revestida com feltro de fios de nylon ou poliéster (fixados com cola). A finalidade do revestimento é impedir o contato direto entre a campânula e o vidro durante o processo de vibração (que elimina bolhas de ar do cimento), evitando a danificação do corpo e o processo galvânico que deteriora o zinco devido à existência de álcalis, sódio e potássio na composição química do vidro. O pino metálico, na parte a ser cimentada dentro da campânula, é revestido com verniz especial para modificar o estado da sua superfície. Este processo aumenta a resistência aos esforços de compressão e cisalhamento do cimento quando o isolador é submetido à tração. Para formar as cadeias de isoladores são utilizados engates do tipo concha-bola.

Segundo Schmidt (1986), apesar de todos os aperfeiçoamentos tecnológicos os isoladores de vidro são os componentes mais vulneráveis da cadeia, por serem submetidos aos seguintes esforços:

- a) cargas mecânicas alternativas, resultantes de pressão do vento e mudança de temperatura;
- b) solicitações elétricas: distribuição de potencial variável em função da posição do isolador na cadeia (LEITE et al., 2004); correntes de fuga variáveis conforme o grau de poluição e chuva; surtos de sobretensão, etc;
- c) esforços causados por condições excepcionais, como superaquecimento devido ao arco elétrico;
- d) esforços térmicos devido a mudanças climáticas;
- e) ruptura do isolamento (disco de vidro) por atos de vandalismo.

A Figura 3 mostra fotografias de isoladores de vidro quebrados. Após a retirada do cimento e do pino metálico, nota-se que o vidro remanescente no interior do isolador fica

totalmente trincado. Através da técnica de radiografia computadorizada com fonte de irídio-192, é possível identificar detalhes no interior da campânula que não são observáveis a olho nu, como o pino metálico e as trincas no vidro remanescente.

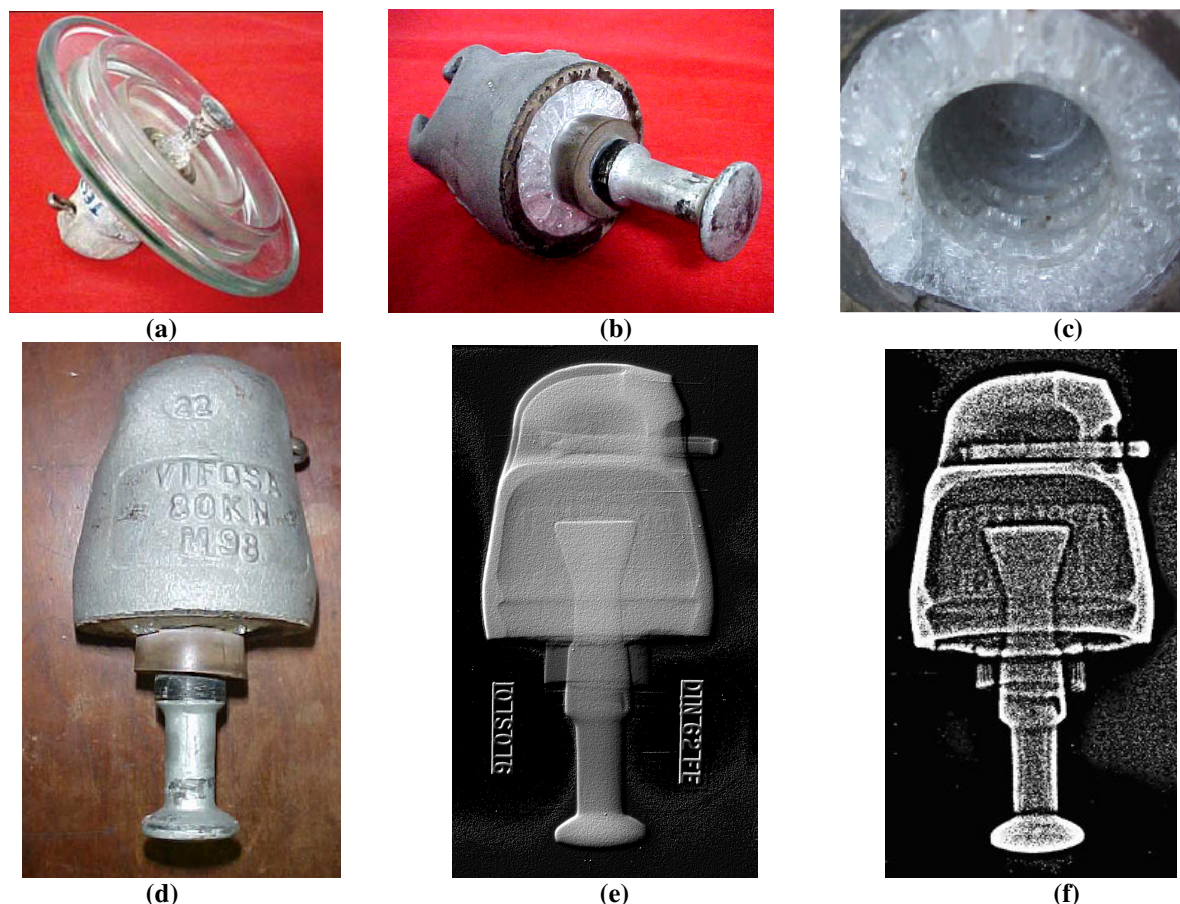


Figura 3. Comparação entre isolador de vidro íntegro e quebrado. (a) Íntegro. (b) Quebrado. (c) Interior de um isolador quebrado¹. (d) Fotografia de um isolador de vidro quebrado. (e) Imagem de radiografia computadorizada processada com filtro “EMBOSS”. (f) Imagem de radiografia computadorizada processada com filtro “LOG” (SHINOHARA et al., 2005, 2007).

A Tabela 2 mostra os valores de tensão disruptiva para um isolador de vidro inteiro e outro quebrado. Observa-se que quando inteiro, o isolador é capaz de suportar uma tensão de cerca de 80 kV, mas quando quebrado este valor diminui para 13 kV.

¹ Após a retirada do cimento e pino metálico, estando trincado o vidro remanescente.

Tabela 2. Valores de tensão disruptiva para um isolador de vidro, modelo concha-bola, sob diversas condições.

Características do isolador	Condições do ensaio	Tensão disruptiva (kV)
Inteiro	Seco, sem poluição, ar local (0,95 atm)	80 ^a
	Seco, sem poluição, SF ₆ (0,95 atm)	122 ^a
	Seco, sem poluição, SF ₆ (1,3 atm)	130 ^a
	Seco, sem poluição, vácuo	5 ^a
	Sob chuva, sem poluição, ar local (1 atm)	50 ^b
	Sob neblina sem poluição, ar local (1 atm)	20 ^b
	Sob neblina, com poluição, ar local (1 atm)	7 ^b
Quebrado	Seco, sem poluição, ar local (0,95 atm)	13 ^a
	Seco, sem poluição, SF ₆ (1,3 atm)	15 ^a
	Seco, sem poluição, vácuo	0,5 ^a

(a) Leite (2006).

(b) Rezende (1977).

Além do vidro, os isoladores podem ser fabricados em porcelana ou material compósito (bastão de fibra de vidro e resina epóxi, revestido por borracha de silicone ou EPDM²). Os isoladores compósitos são utilizados mundialmente nas LT's desde o início da década de 1970 e hoje substituem muitas cadeias de isoladores de vidro e porcelana, apesar de que nos últimos 30 anos um número crescente de isoladores compósitos tem falhado por fratura frágil. Estes isoladores apresentam vantagens como menor peso da cadeia, maior resistência ao vandalismo e à descarga elétrica em áreas poluídas, estrutura menos agressiva no aspecto visual e fácil instalação. No entanto, apresentam maior custo e possibilidade de ocorrência de defeitos internos não detectáveis por inspeção visual, como trilhamento interno, erosão, trincas no bastão de fibra de vidro e penetração de umidade, responsáveis pela falha do compósito por fratura frágil. A cobertura polimérica de EPDM é outro ponto fraco do isolador e na falha pode se apresentar totalmente degradada (esfarelamento do material), com fungos, poluição e aparência esbranquiçada. A vida útil de um isolador compósito pode variar de 6 meses a 15 anos, em função do ambiente externo (GARCIA et al., 1997; MELONI et al., 2001; HENNESSEE, 2005).

Para a CHESF, a condição de isolamento mínimo de uma linha de 230kV corresponde a 7 isoladores inteiros e 9 quebrados, ou seja, a empresa adota o número “7”

² EPDM: do inglês *ethylene propylene diene monomer*.

como quantidade mínima de isoladores inteiros necessários à intervenção segura na linha energizada, levando-se em consideração as condições atmosféricas locais (pressão, umidade, temperatura, poluição, salinidade) e estado físico dos isoladores (integridade estrutural, grau de sujeira nos isoladores).

Segundo Pavlik (1989) e Simões (2003), a distribuição de potencial elétrico numa cadeia não é igual para todos os isoladores: aqueles situados próximos à fase e a terra, isto é, nas extremidades da cadeia, estão sujeitos a valores mais elevados de tensão (Figura 4).

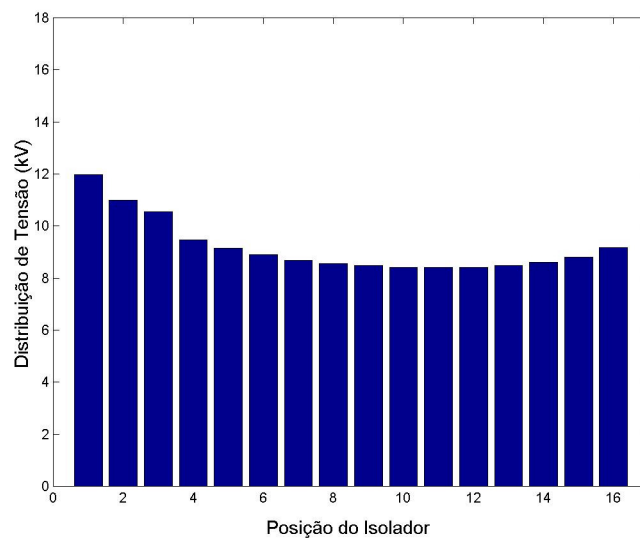


Figura 4. Distribuição de potencial numa cadeia de isoladores de vidro para LT's de 230 kV. (SIMÕES, 2003).

Em trabalhos anteriores (LEITE et al., 2004) foram determinados os valores de tensão disruptiva de uma cadeia de isoladores de vidro para linhas de 230kV na condição de isolamento mínimo (9 unidades quebradas e 7 íntegras), utilizando 5 arranjos diferentes (Figura 5), isoladores secos e sem poluição. Os resultados mostraram que o arranjo nº 4 – que possui os 7 isoladores íntegros dispostos uniformemente ao longo da cadeia – apresentou tensão disruptiva superior às demais configurações (505 kV em frequência industrial). Por outro lado, o pior arranjo para a condição de isolamento mínimo foi o de nº 1, que possuía os 7 isoladores inteiros no topo da cadeia (448 kV em frequência industrial).

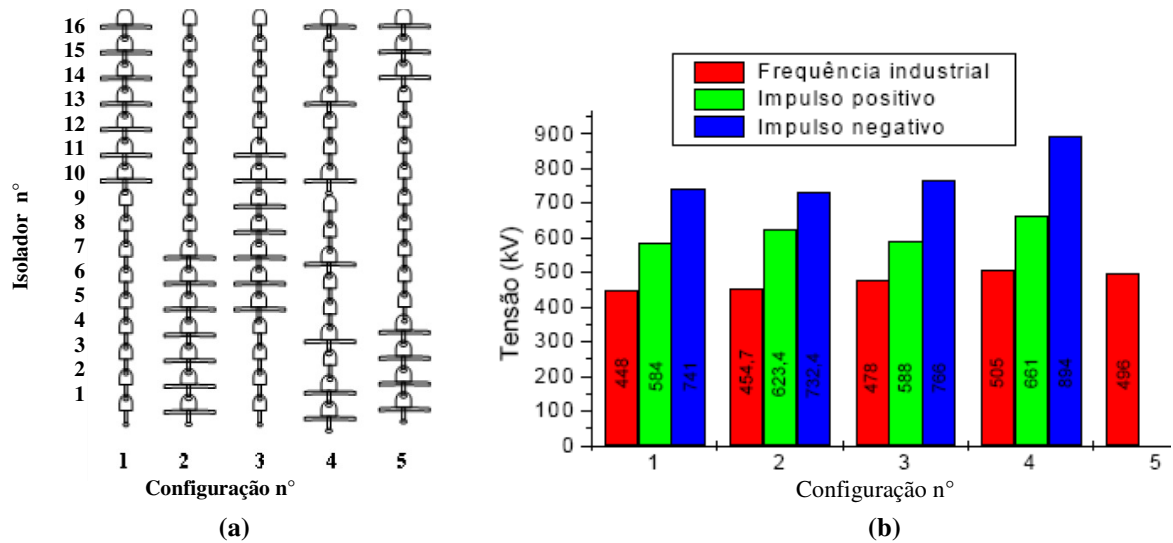


Figura 5. Ensaio de alta tensão com variação da posição dos isoladores íntegros ao longo da cadeia, na condição de isolamento mínimo. (a) Arranjos testados por Leite et al. (2004). (b) Valores experimentais.

Assim, dentre as inúmeras configurações possíveis para uma cadeia com 7 isoladores íntegros e 9 quebrados, existirão algumas capazes de suportar elevados valores de tensão disruptiva, como o arranjo n° 4 mostrado na Figura 5. Conseqüentemente, para minimizar os custos com a utilização de escudos balísticos, não haveria necessidade de proteger todos os isoladores de vidro de uma cadeia, mas somente aqueles localizados em posições estratégicas, por exemplo, os de n° 1, 2, 4, 7, 10, 13 e 16 do arranjo n° 4.

O arco elétrico em um isolador quebrado pode ocorrer interna ou externamente; a descarga interna acontecerá do pino metálico para a campânula seguindo o caminho entre as fissuras do vidro quebrado, enquanto que a descarga externa será entre a borda da campânula e o pino. O arco elétrico da descarga interna possui coloração alaranjada devido à carbonização do cimento e o arco elétrico que ocorre externamente possui coloração azul-lilás devido à formação de ozônio. Por outro lado, para um isolador íntegro a descarga ocorre sempre externamente entre o pino e a campânula, contornando o material dielétrico, isto é, o vidro (Figura 6).

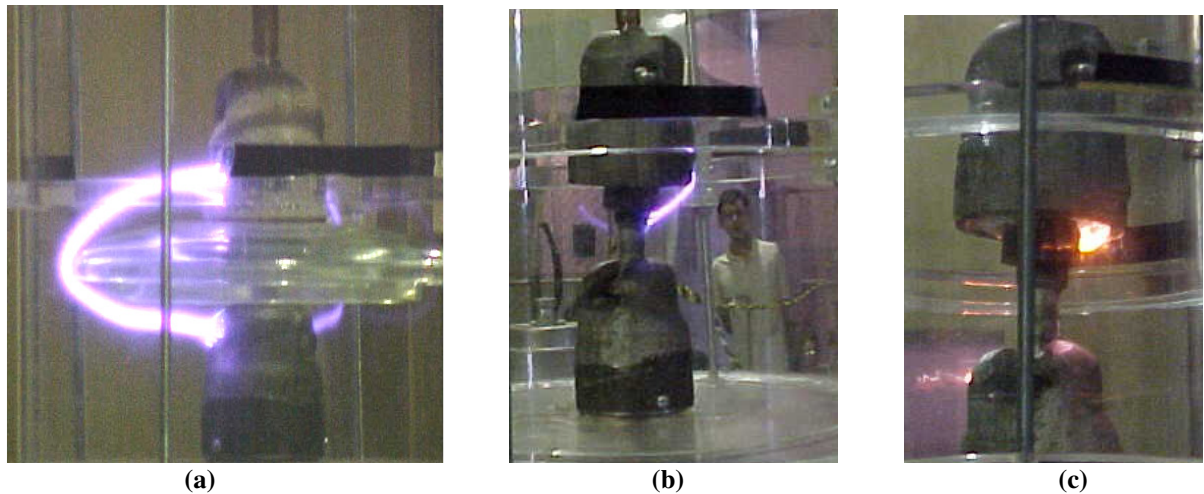


Figura 6. Disrupção elétrica a seco em isoladores de vidro modelo concha-bola. (a) externamente no isolador íntegro e sem poluição. (b) externamente no isolador quebrado e sem poluição. (c) internamente no isolador quebrado e sem poluição. (SHINOHARA et al., 2003; LEITE, 2006).

2.2 Propriedades ópticas do vidro soda-cal

Segundo Alves et al. (2001) o vidro pode ser definido como “um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material, inorgânico, orgânico ou metal, formado por qualquer técnica, que exibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro”.

As propriedades ópticas dos vidros soda-cal são bastante influenciadas por baixas quantidades de elementos adicionados à composição química. Estes elementos podem alterar a coloração dos vidros, como é o caso dos 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).

A irradiação gama (γ) pode ser usada para aumentar a absorção óptica de vidros, tendo sido estudada há mais de quatro décadas. Recentemente, muitos estudos têm sido conduzidos para obtenção de dosímetros de altas doses feitos com vidros soda-cal. No Brasil, o uso da radiação gama é uma tecnologia bem estabelecida, cuidadosamente controlada e usada há mais de 20 anos (RODRIGUES JR.; CALDAS, 2002; TEIXEIRA; CALDAS, 2002; ZHENG et al., 1988).

O principal efeito da radiação ionizante no vidro é a coloração visível causada pela criação de centros de cor, um mecanismo que produz no material um rápido crescimento da absorção óptica, mas que se satura em níveis que dependem da concentração de impurezas e da composição do vidro, assim como da taxa de dose, temperatura e tempo da irradiação (SIBLEY, 1988).

Durante a irradiação X ou gama, os átomos da matriz e/ou das impurezas (como Fe, Al e Cr) passam a capturar elétrons ou lacunas causando mudança em seu estado de valência e atingindo níveis de energia capazes de absorver fótons na região ultravioleta-visível do espectro eletromagnético. A Figura 7 mostra o esquema das possíveis transições eletrônicas conforme a Teoria de Bandas, segundo McKeever (2001).

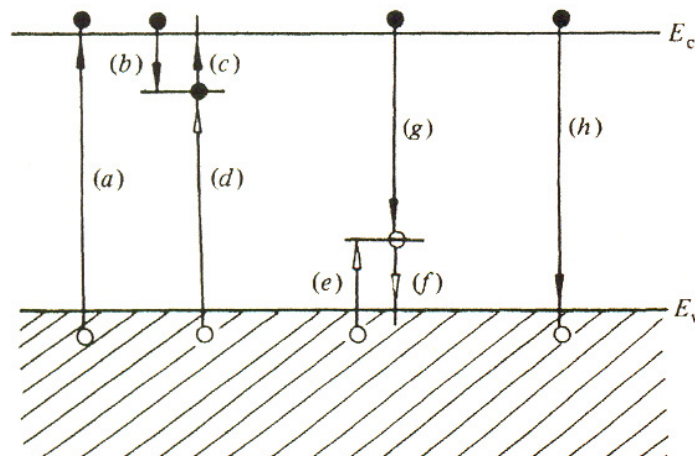


Figura 7. Transições eletrônicas possíveis em materiais isolantes e semicondutores. (a) Ionização. (b) Aprisionamento do elétron. (c) Liberação do elétron. (d) Recombinação indireta da lacuna. (e) Aprisionamento da lacuna. (f) Liberação da lacuna. (g) Recombinação indireta do elétron. (h) Recombinação direta do elétron. (MCKEEVER, 2001).

A transição “a” corresponde à excitação de um elétron da banda de valência para a banda de condução, na qual o elétron possui energia suficiente para mover-se livremente pelo material. Para cada elétron livre existente na banda de condução, existe uma lacuna ou vazio na banda de valência. Portanto, a ionização cria pares de elétrons e lacunas, que podem migrar pela estrutura do vidro ou estar localizados pontualmente como centros de defeitos (ou centros de cor). Muitos pares de elétron-lacuna são criados durante a ionização, já que a criação de cada par necessita de apenas 20 eV aproximadamente. Os elétrons livres podem ser aprisionados (transição “b”), assim como também as lacunas (transição “e”), e podem ser liberados novamente por excitação térmica (transição “c”) ou por excitação óptica (transição “f”), ficando livres novamente para migrar pelo material. Uma segunda opção aos elétrons livres e lacunas é que eles podem se recombinar com carregadores de carga oposta tanto de forma direta (transição “h”), quanto indiretamente (transição “g” para os elétrons, transição “d” para as lacunas). Se qualquer um desses mecanismos de recombinação for acompanhado pela emissão de luz, tem-se o fenômeno de luminescência (MCKEEVER, 2001).

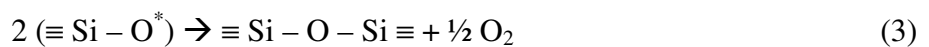
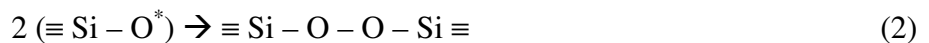
Os centros de cor induzidos no vidro soda-cal são instáveis em temperatura ambiente, e após a irradiação o material apresenta uma diminuição na sua densidade óptica, processo conhecido como *fading* – do inglês *fade*, descolorir, desbotar – que se estabiliza por volta de 40 dias após a irradiação (EHRT; VOGEL, 1992; AMOSSOV; RYBALTOVSKY, 1994; KOWAL et al., 2000; ALVES et al., 2001; SLOWINSKI; ADAWI, 2001; RODRIGUES JR.; CALDAS, 2002; SHENG et al., 2002; TEIXEIRA; CALDAS, 2002; YOSHIMURA et al., 2002).

Esses defeitos induzidos podem ser retirados do vidro através de tratamento térmico, conhecido como *isothermal bleaching*, um “clareamento” em temperatura constante – 300°C por cerca de 15 minutos em vidros soda-cal (ZHENG et al., 1988; QUEZADA; CALDAS, 1999; SUSZYNSKA; MAKALIK, 2001).

O centro de cor mais importante em vidros soda-cal é o *non-bridging oxygen hole center* (NBOHC), representado por $\equiv\text{Si}-\text{O}^*$, em que o símbolo “ $\equiv$ ” indica três ligações do átomo de Si com outros átomos de oxigênio na matriz vítrea, enquanto que “ $*$ ” significa um elétron desemparelhado, causado pela ruptura da ligação covalente Si–O. Normalmente, os NBOHC’s estão localizados em diferentes locais da estrutura vítrea e são potenciais armadilhas de elétrons (MCKEEVER, 2001; KOWAL et al., 2000; SLOWINSKI; ADAWI, 2001; SUSZYNSKA; MACALIK, 2001; YOSHIMURA et al., 2002).

Os óxidos alcalinos e alcalinos terrosos presentes nos vidros soda-cal atuam como modificadores de rede, em que seus íons (Na^+ , K^+) podem entrar na estrutura tetraédrica da sílica quebrando os pontos de junção entre os átomos de silício e oxigênio, produzindo NBOHC’s sem a ação da irradiação, ou então, podem permanecer nos interstícios da estrutura vítrea. Já os óxidos intermediários, como Al_2O_3 , podem entrar na rede na forma de tetraedros de AlO_4^{-4} , substituindo grupos de SiO_4^{-4} , sendo a neutralidade elétrica atingida por cátions alcalinos presentes nos interstícios. A coloração fumê-marrom adquirida por vidros soda-cal irradiados está relacionada à ejeção do elétron de um átomo de oxigênio adjacente à impureza substitucional Al^{+3} do tetraedro $[\text{AlO}_4]$ (MCKEEVER, 2001; ALVES et al., 2001).

De acordo com a estrutura do vidro, o NBOHC produzido pela irradiação- γ está rodeado de elétrons e outros NBOHC’s. Os elétrons são móveis e conseguem difundir-se na matriz vítrea, enquanto que um NBOHC é imóvel. Depois da irradiação, algumas reações ocorrem no vidro, como se seguem (SHENG et al., 2002):



A Equação 1 mostra a recombinação do NBOHC com elétrons vizinhos, o que significa que esta reação é controlada principalmente pela difusão dos elétrons na matriz

vítrea. Sheng e colaboradores (2002) descrevem que esta reação é muito breve mesmo em temperatura ambiente e existe durante todo o período de *fading* dos centros de cores induzidos, obedecendo à cinética de primeira-ordem. Por outro lado, as Equações 2 e 3 obedecem, segundo o autor, à cinética de segunda-ordem e existem sem levar em conta o tempo de irradiação. Durante o *fading* que ocorre no curto-prazo, isto é, nos primeiros dias após a irradiação, um NBOHC normalmente reage apenas com NBOHC's vizinhos (ou outros vazios). Porém, quando o tempo da irradiação é maior que o tempo de *fading* no curto-prazo (horas ou dias), a cinética de segunda-ordem passa a governar o processo de *fading*. Isto pode ser explicado pela alta concentração de NBOHC's produzidos na irradiação de longo tempo.

2.3 Materiais do escudo balístico

Os materiais avaliados neste trabalho para a confecção do escudo balístico foram o policarbonato e o compósito epóxi-vidro, descritos a seguir.

2.3.1 O policarbonato

O policarbonato (PC) é um termoplástico de engenharia amorfo pertencente à família do poliéster e possui este nome devido aos grupos carbonatos presentes na cadeia principal (Figura 8).

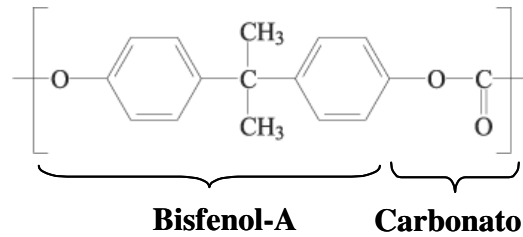


Figura 8. Estrutura (mero) do PC.

O PC possui excelentes propriedades ópticas, mecânicas, físicas e de processamento, e tornou-se muito conhecido por ser transparente como o vidro e resistente como o aço. Sua principal propriedade mecânica é a resistência ao impacto (acima de 900 J/m), que chega a ser 250 vezes maior que a de um vidro temperado, segundo Albuquerque (1999). Tais propriedades são exploradas em diversas áreas, tendo sua maior aplicação nas indústrias automobilística, eletroeletrônica e eletrodoméstica, informática (CD's e DVD's), alimentício, material médico-hospitalar, na fabricação de lentes oftálmicas, construção civil, equipamentos de segurança e blindagem (RAMANI; RANGANATHAIAH, 2000; SECEX, 2005). Suas principais propriedades estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Principais propriedades do PC.

Propriedade	Valor
Temperatura de transição vítrea (T_g) (10°C/min; M_w = 37.000 g/mol)	140-150°C
Temperatura de fusão (T_m)	220-230 °C
Massa específica	1,196-1,200 g/cm ³
Calor de fusão (ΔH_m)	109,6-142,3 J/g
Resistência à tração na ruptura	70 MPa
Alongamento na ruptura	210%
Resistência à flexão no escoamento	110 MPa
Módulo de flexão	2760 MPa
Dureza Rockwell	118
Resistência ao impacto IZOD com entalhe (23°C)	970 J/m
Resistividade (ohm.m)	1,00E ⁺¹⁵
Rigidez dielétrica no ar (3,2 mm)	14,9 kV/mm
Constante dielétrica (ϵ_r)	3,17

(SOHN, 2000; GE PLASTICS, 2005).

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. Em seu estado natural essas resinas apresentam-se transparentes. Os grupos benzênicos presentes na cadeia principal tornam a molécula de PC 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) ao PC (em torno de 145°C); isto implica em elevados valores para as propriedades térmicas do material, e estabilidade dimensional muito boa (GE PLASTICS, 2005).

2.3.2 O compósito epóxi-vidro

Desde a década de 1970 fibras e tecidos têm sido usados no reforço de polímeros, dando origem aos compósitos de matriz polimérica, e atualmente são considerados excelentes materiais de engenharia, sendo empregados em diversos segmentos industriais, como aeronáutico, eólico, marítimo, elétrico e bélico (COSTA et al., 2001; ALVES et al., 2004; MAHFUZ et al., 2005; HIPÓLITO et al., 2006; RIEDEL et al., 2006).

Um compósito pode se definido como uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, tendo uma interface reconhecível entre si. A intenção desta mistura é obter um material com propriedades superiores e únicas em relação às propriedades individuais dos seus constituintes (SHAFFER et al., 2004).

Em aplicações estruturais, quando uma elevada relação resistência/ peso é fundamental para o projeto, os compósitos de matriz polimérica vêm substituindo com sucesso uma série de materiais convencionais, por combinarem baixa massa específica com

elevados valores de resistência mecânica e rigidez. Além disso, possuem elevada resistência à fadiga e à corrosão, isolamento acústico, baixa condutividade térmica e facilidade de obtenção de geometrias complexas (COSTA et al., 2001; COSTA et al., 2003; ALVES et al., 2004; MAHFUZ, et al., 2005; RIEDEL et al., 2006; HIPÓLITO et al., 2006).

Os constituintes de um compósito classificam-se em *matriz* e *reforço*. Os materiais de reforço mais comuns são as fibras, que podem ser naturais ou sintéticas, contínuas ou picadas, orientadas ou distribuídas randomicamente na matriz. No caso de compósitos estruturais, as fibras mais comuns são de carbono, aramida (*kevlar*®) e vidro. Hoje estão disponíveis comercialmente fibras de diversas gramaturas (kg/m²) e orientações.

As fibras de vidro mais utilizadas são de alumino-silicato de magnésio (*S-glass*) e de alumino-boro-silicato de cálcio (*E-glass*), sendo obtidas com espessura de 5–20 µm (SHAFFER et al., 2004). O vidro deve ser livre de álcalis, para evitar o aparecimento de fissuras capilares tendentes a reter umidade, prejudicando a propriedade de resistência superficial. A fibra de vidro se caracteriza por uma estabilidade térmica sensivelmente mais elevada do que a de outras fibras, e quando associadas a resinas da família epóxi são capazes de suportar temperaturas de 200–300 °C ou mais. Casos típicos são as câmaras de extinção de arco voltaico, sobretudo em disjuntores de média e alta-tensão (SCHMIDT, 1986).

A matriz do compósito pode ser metálica, cerâmica ou polimérica. Para os compósitos de matriz polimérica, ou simplesmente compósitos poliméricos, as resinas podem ser termoplásticas (como poliéster) ou termorrígidas (como a epóxi e poliimida, bastante utilizadas em compósitos de alta *performance*). A principal função da matriz é compartilhar os esforços mecânicos com as fibras e atuar como revestimento/ proteção das mesmas, por isso deve ser escolhida de acordo com o ambiente em que irá operar. Para a cura da resina adiciona-se um endurecedor ou catalisador, que irá promover as ligações cruzadas entre as moléculas da resina.

A temperatura de transição vítrea (T_g) da matriz epóxi varia em função do tipo de resina e endurecedor e das condições de cura (tempo, pressão, temperatura). Em geral, as resinas epóxi curam em temperaturas de 130–200 °C, num tempo variável de 15 minutos a 1 hora, ou em temperatura ambiente num período de alguns dias (DUBEY et al., 1992; COSTA et al., 2003). A Figura 9 mostra os valores de dureza e resistência à tração da resina epóxi em comparação a outros tipos de resinas, em diferentes condições de cura.

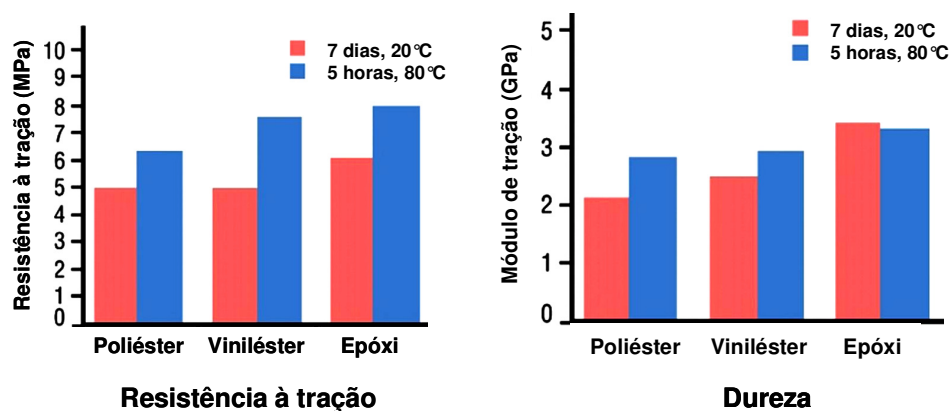


Figura 9. Resistência à tração e dureza de diferentes resinas poliméricas. ³ (SP COMPOSITES, 2007).

As propriedades mecânicas dos compósitos variam segundo os parâmetros de cura, do processo de fabricação, qualidade das matérias-primas, orientação das fibras, dentre outros fatores. Segundo Botelho e Rezende (2002), determinar a resistência mecânica dos compósitos poliméricos é uma tarefa difícil, devido a sua natureza anisotrópica⁴ e sua resposta não linear sob esforços cisalhantes. Geralmente, os compósitos poliméricos apresentam excelente resistência à fadiga quando comparados à maioria dos metais. As resinas epóxi tendem a exibir superior resistência à fadiga em relação à resina poliéster, razão pela qual são preferíveis nas estruturais aeroespaciais.

³ Cura a 20°C, 7 dias. A resina epóxi tem propriedades superiores às resinas termoplásticas (poliéster e viniléster). A melhoria das propriedades também se observa depois da pós-cura (80°C, 5h).

⁴ Anisotropia: variação da propriedade física do material em função da direção.

As principais falhas mecânicas nos compósitos poliméricos ocorrem na interface fibra-matriz e caracterizam-se por uma delaminação (descolamento) interlaminar (Figura 10). Para que a resistência do compósito seja máxima, é necessário que a matriz se alongue, pelo menos, no mesmo valor que as fibras de reforço (Figura 11). Por este motivo, uma boa adesão entre matriz e reforço é necessária para que a transferência de carga seja eficiente e evite a delaminação durante uma solicitação mecânica (BOTELHO; REZENDE, 2002),

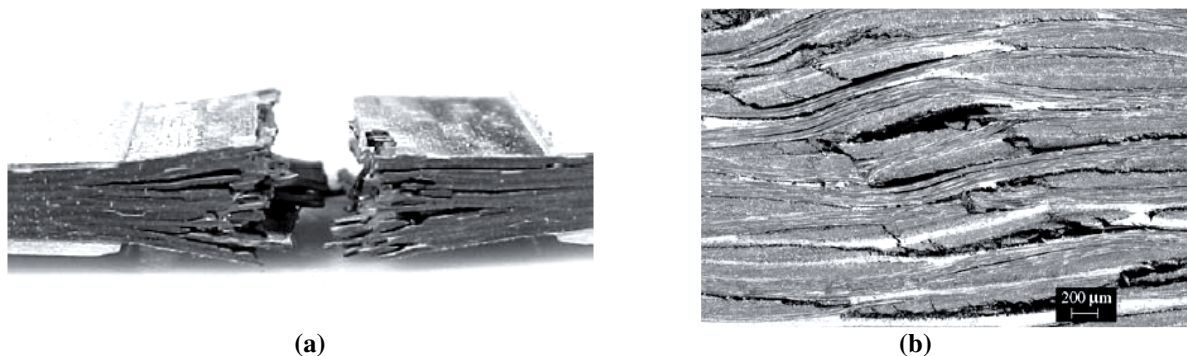


Figura 10. Exemplos de delaminação em compósitos. (a) Compósito epóxi e fibra de carbono após ensaio de compressão. (b) Imagem de microscopia eletrônica de varredura em compósito epóxi e fibra de carbono após ensaio de cisalhamento. (PAIVA et al., 2005).

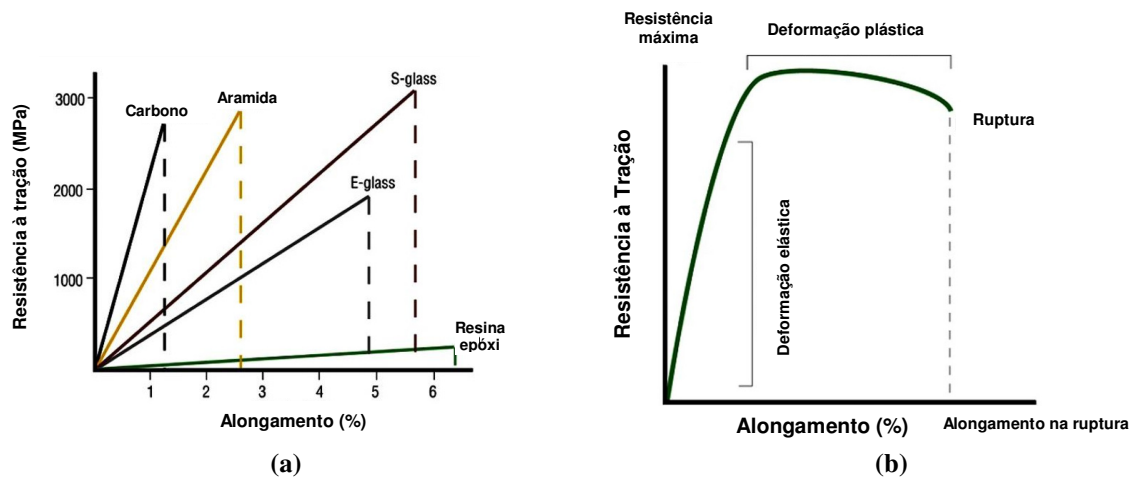


Figura 11. Propriedades mecânicas dos compósitos. (a) Resistência à tração para diferentes fibras. (b) Tensão-deformação para um sistema de resina ideal. (SP COMPOSITES, 2007).

Os principais defeitos encontrados em compósitos epóxi-vidro são os vazios e as trincas no interior e na superfície do laminado, que prejudicam o desempenho mecânico

desses materiais. Segundo Costa et al. (2003), a formação desses defeitos deve-se, em geral, a uma série de fatores: bolhas de ar aprisionadas no sistema de resina; bolsas (excesso) de resina no laminado; umidade absorvida pelas matérias-primas durante a armazenagem e também pelo laminado durante seu processamento; ciclos de cura inadequados (valores de pressão e temperatura impróprios). Hoje, as técnicas mais eficazes para inspeção não destrutiva em compósitos estruturais são o ultra-som e a radiografia (COSTA et al., 2001; BOERI et al., 2006). Estudos com radiografia computadorizada têm demonstrado a potencialidade desta técnica na caracterização do compósito em relação a regiões ricas ou pobres em resina, áreas de colagem, alinhamento das fibras, delaminação, porosidade, fratura, trincas, danos por ferramentas, danos por impacto e degradação ambiental (YANAGUIZAWA et al., 2007).

2.4 Avaliação das propriedades mecânicas do escudo balístico

2.4.1 Ensaios balísticos

Materiais poliméricos reforçados por fibras vêm sendo utilizados na indústria bélica desde a Segunda Guerra Mundial e atualmente também são encontrados nos setores de blindagem e segurança, constituindo coletes a prova de bala entre outros dispositivos. A tendência atual nos projetos de blindagens está direcionada, segundo Alves e colaboradores (2004), para uma melhor relação proteção/peso e, em consequência, os compósitos conseguem atender tal necessidade.

A blindagem rígida ou blindagem têxtil laminada, formada por camadas de tecido unidas por uma resina comporta-se, no ensaio balístico, como um material conjugado, pois além de resistirem à penetração do projétil, absorvem a energia de impacto resultante do choque do projétil com o alvo. Blindagens de compósito com fibra de polietileno de altíssimo peso molecular (*ultra-high molecular weight polyethylene*) são empregadas em proteções pessoais (coletes e capacetes) face a sua baixa densidade e elevada tenacidade (ALVES et al., 2004).

A avaliação do desempenho de uma blindagem depende da interação do projétil com o alvo e compreende, basicamente, a verificação da ocorrência ou não da sua falha e a determinação dos danos produzidos pelo impacto balístico. A falha de uma blindagem é analisada, normalmente, em função da ocorrência ou não de penetração. A penetração, termo utilizado para se definir a entrada de um projétil no alvo, pode ser parcial ou total. Na penetração parcial, o projétil atinge o alvo sem atravessá-lo, enquanto que na penetração total ou completa ocorre sua perfuração. A avaliação do que significa a ocorrência ou não de uma perfuração depende do critério de avaliação empregado. Existem três critérios para se avaliar a falha de uma blindagem: do Exército, da Marinha e o de Proteção, cada qual definindo de um modo particular o significado de uma perfuração (penetração completa). O critério da Marinha, por exemplo, estabelece que uma perfuração ocorre quando o projétil ou a maior parte dele passa completamente pela blindagem. Este será o critério adotado neste trabalho.

A delaminação (fratura inter-laminar), o estilhaçamento superficial e a penetração do projétil no laminado são modos de falha do compósito resultantes de cargas de impacto. Impactos a baixa velocidade estão associados a danos de delaminação; este descolamento inter-laminar inicialmente reduz a rigidez à flexão local e então pode afetar o comportamento mecânico de toda a estrutura. À medida que a energia (velocidade) de impacto aumenta, podem ocorrer simultaneamente a delaminação e o estilhaçamento superficial, seguidos pela

penetração do laminado. O desempenho balístico de compósitos de grafite-epóxi, largamente utilizados em estruturas aeroespaciais e componentes de satélites, foram estudados por Tennyson e Lamontagne (2000) utilizando alta velocidade de impacto (2–7 km/s) e trajetórias oblíquas.

2.4.2 Ensaio de tração

Entre os diversos tipos de ensaios disponíveis que utilizam corpos de prova padronizados para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais amplamente utilizado é o ensaio de tração, por ser relativamente simples e de realização rápida. Consiste na aplicação gradativa de uma carga de tração uniaxial às extremidades do corpo de prova. O levantamento da curva tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo constitui o resultado do ensaio, o qual é fortemente influenciado pelas condições do ensaio, como temperatura e velocidade de deformação (GARCIA et al., 2000).

No ensaio de tração, as principais características mecânicas do material que podem ser obtidas são: módulo de elasticidade ou de Young (E), limite de escoamento (σ_e), limite de resistência à tração (σ_u), limite de ruptura (σ_r) e módulo de tenacidade (U_t).

As tensões em qualquer região da curva são calculadas através da razão entre a força (carga) aplicada e a área de seção transversal inicial do corpo de prova.

O módulo de Young (E) fornece uma indicação da rigidez do material e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas, o que explica seu comportamento inversamente proporcional à temperatura. É determinado pelo quociente da tensão (σ) pela deformação específica (ϵ) na região linear (elástica) do diagrama tensão-deformação, ou seja

$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$. A deformação específica representa o aumento percentual do comprimento do corpo de prova em relação ao seu comprimento inicial l_0 ; é calculada através da relação $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100$, onde $\Delta l = l - l_0$ é o alongamento do corpo de prova, sendo l o comprimento de sua região útil (GARCIA et al., 2000).

O escoamento é entendido como um fenômeno localizado, que se caracteriza por um aumento relativamente grande na deformação, acompanhado por uma pequena variação na tensão. O limite de escoamento (σ_e) pode ser atribuído ao ponto de máxima tensão atingida pelo corpo de prova na região do escoamento (GARCIA et al., 2000). O valor da deformação no escoamento para polímeros ocorre tipicamente para alongamentos de 5 a 10% (ANGELINI, 1999).

Após o escoamento, o material entra na região plástica, caracterizada pela presença de deformações permanentes no corpo de prova e geralmente ocorre acompanhada de estricção do seu comprimento útil (CANEVAROLO JR., 2002). Nessa região são determinados o limite de resistência à tração (σ_u , máxima tensão atingida durante o ensaio, que pode coincidir com o valor de σ_e), limite de ruptura (σ_r , última tensão suportada pelo material antes da ruptura).

Certos polímeros, em particular os termoplásticos no estado vítreo, ainda na fase elástica, são capazes de sofrer uma forma de deformação plástica devido à formação de fissuras (*crazing*) como se fossem pequenas trincas na superfície do corpo de prova e orientadas perpendicularmente ao eixo da tensão aplicada. Tais fissuras ocorrem na metade do valor da tensão de escoamento, mas não causam mudança na inclinação da curva tensão-deformação, pois a fração de volume do material fissurado é, inicialmente, muito baixa. A propagação das fissuras leva ao início de trincas que crescem e se propagam pelo material levando-o à fratura. Durante a fase de estricção, cavidades denominadas “diamante” podem se

iniciar a partir de fissuras na superfície do material estirado, as quais se deformam plasticamente paralelas à direção do estiramento (ANGELINI, 1999).

O módulo de tenacidade (U_t) corresponde à energia absorvida por unidade de volume do material desde o início do ensaio até a fratura, obtido pela área total sob a curva tensão-deformação (GARCIA et al., 2000).

Em geral, os polímeros apresentam grandes valores de deformação específica na ruptura (até 900%) e valores muito baixos de resistência à tração quando comparados aos metais. De acordo com seu comportamento mecânico, os polímeros se caracterizam como elásticos, frágeis e dúcteis, e esse comportamento depende de sua estrutura molecular e condições de ensaio (temperatura, velocidade). Os polímeros elásticos ou elastômeros, como a borracha, exibem alta deformação específica e baixa tensão. Para polímeros dúcteis, como o PC e o epóxi, a curva tensão-deformação típica (Figura 12) apresenta um ponto de escoamento (onde atinge a tensão máxima) e em seguida deformação plástica (estiramento) antes da ruptura propriamente dita. Um polímero frágil tende a ser quebradiço, falhando sob baixas deformações e com pouca deformação plástica (ANGELINI, 1999).

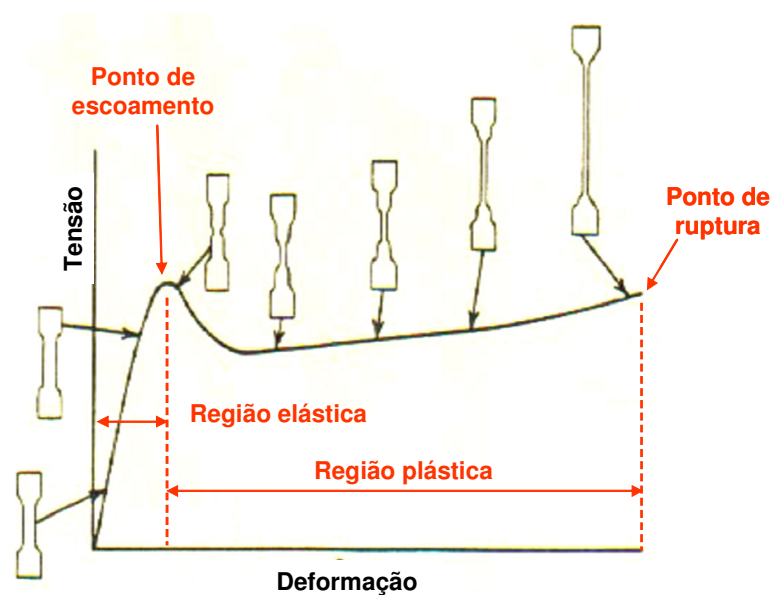


Figura 12. Curva tensão-deformação típica de polímeros dúcteis.

2.4.3 Ensaio de impacto

A resistência ao impacto é a propriedade mecânica mais importante que o escudo balístico deve atender. O ensaio de impacto permite estudar os efeitos das cargas dinâmicas sobre o material e utiliza o princípio da absorção de energia a partir da energia potencial de um pêndulo ou da queda de um peso sobre a amostra. A energia absorvida no impacto, também chamada de tenacidade, é a energia necessária à fratura do material e difere-se do módulo de tenacidade U_t do ensaio de tração pela sua natureza dinâmica.

Os modos de impacto mais comuns são o *Izod* e *Charpy*. Estes modos consistem em medir a quantidade de energia absorvida pela amostra quando submetida ao golpe de um pêndulo padronizado. O golpe é desferido por um peso em oscilação, erguido a uma altura fixa, onde adquire uma energia potencial inicial; ao ser liberado, ele encontra no seu percurso o corpo de prova e o rompe. A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia potencial final. A diferença entre as energias inicial e final corresponde à energia de impacto, isto é, a energia absorvida pelo material. As energias de impacto são de interesse comparativo entre diferentes materiais; entretanto, seus valores absolutos isoladamente não representam informação quantitativa das características dos materiais (GARCIA et al., 2000).

2.4.4 Ensaio de microdureza

A microdureza é outra propriedade mecânica importante para a avaliação do material do escudo balístico; é a dureza do material em escala micrométrica, sendo a dureza definida como a resistência à penetração ou ao risco de um material. Um método bastante utilizado para calcular a microdureza é através do indentador tipo Vickers (ponta de diamante piramidal de 136°). A determinação da microdureza faz-se pela medição do comprimento das diagonais indentadas (Figura 13), e calculada através da Equação 4, onde F é a carga aplicada (kg) e d é o valor médio das diagonais medidas (mm) (SUWANPRATEEB, 1998).

$$H_v = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

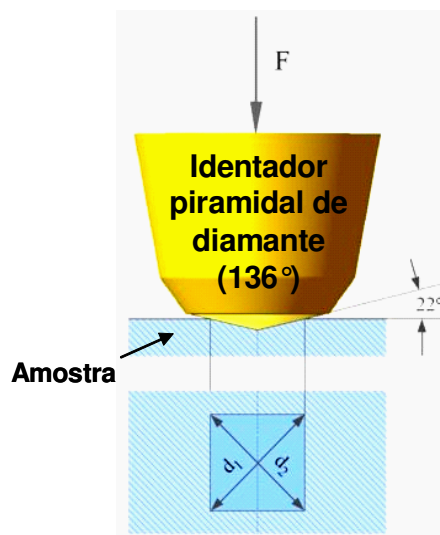


Figura 13. Identação das diagonais sobre a superfície da amostra para a determinação da microdureza Vickers, indentador com ponta piramidal de diamante.

2.5 Avaliação das propriedades elétricas do escudo balístico

Uma das mais importantes características de um material dielétrico é a sua resistência à passagem interna de corrente, quando se aplica uma tensão elétrica. Em um dielétrico perfeito, quando submetido a um campo elétrico, não há condução de corrente elétrica entre os eletrodos. Na natureza, somente o vácuo tem essa propriedade.

Entretanto, a característica de não conduzir corrente tem um limite prático, quando um dado valor crítico de tensão é ultrapassado. O valor crítico da tensão dá origem a um valor de ruptura ou de descarga do campo elétrico. Esse valor de ruptura por unidade de espessura do material é chamado rigidez dielétrica, uma propriedade medida em kV/mm (SCHMIDT, 1986).

2.5.1 Rigidez dielétrica em sólidos

A rigidez dielétrica é uma propriedade de interesse para materiais expostos a um campo elétrico, como é o caso dos escudos balísticos. Esta propriedade é em muitos casos o fator determinante na seleção de materiais e projeto de aparatos elétricos. A partir das medidas de rigidez dielétrica é possível caracterizar alterações decorrentes de processos de manufatura, envelhecimento e degradação. Uma característica predominante e típica da ruptura elétrica é o fato de que seu valor não depende da temperatura nem do tempo de aplicação da tensão (SCHMIDT, 1986).

Os polímeros são na maioria os melhores isolantes elétricos e mais econômicos. Geralmente exibem boas propriedades dielétricas, como alta resistência à ruptura (rigidez dielétrica acima de 10 kV/mm). Estas características, associadas às várias outras propriedades (mecânicas, resistência à corrosão, custo) tornam crescente o uso de polímeros como isolantes elétricos (DISSADO; FOTHERGILL, 1992).

Polímeros, como o PC e o epóxi, quando submetidos a elevados campos elétricos polarizam-se e podem apresentar movimentação de cargas livres, que interferem na sua rigidez dielétrica e na dissipação de energia do material. Essa polarização é uma forma de ordenamento espacial das partículas eletricamente carregadas em seu interior, sob a ação de um campo elétrico. Tanto a polarização quanto a corrente de condução que se estabelecem no dielétrico são causadas pelo movimento de partículas eletricamente carregadas. Inúmeros fatores influenciam o processo de ruptura elétrica, e podem ser associados não só às impurezas que permeiam um composto isolante, mas também à existência de cargas elétricas e ainda à morfologia das cadeias poliméricas (grau de cristalinidade) (DUARTE, 2001).

Num ensaio de rigidez dielétrica, a ruptura ocorre através da espessura da amostra, sendo audível e visível, e resulta numa degradação pontual e visível na região da ruptura. Ao se repetir o teste com a mesma amostra, ocorrerá uma diminuição da tensão disruptiva no material e mais visível será o ponto de ruptura.

Para materiais sólidos, a grandeza da intensidade de campo elétrico na ruptura depende acentuadamente da estrutura molecular do corpo de prova, da configuração do campo aplicado (geometria e disposição dos eletrodos e do corpo de prova) e do tipo de tensão do ensaio. Considerando um campo elétrico homogêneo, o valor da rigidez dielétrica varia linearmente com a espessura do corpo de prova (SCHMIDT, 1986).

No entanto, a densidade do campo elétrico aumenta próximo às bordas do eletrodo de ensaio, sejam cilíndricos ou placas paralelas, diminuindo assim a homogeneidade do

campo e, conseqüentemente, levando ao aparecimento do efeito corona (descargas superficiais no corpo de prova) e ruptura em valores inferiores à real tensão de ruptura. Esse fenômeno é chamado de efeito de bordas e para ser reduzido, utilizam-se óleos isolantes como meio circunvizinho aos corpos de prova ensaiados (SCHMIDT, 1986).

2.5.2 Árvores elétricas e arborescências em água

Argumenta-se que o principal mecanismo de degradação elétrica presente em polímeros em geral, é a formação e crescimento de arborescências em água (*water trees*) e árvores elétricas (*electrical trees*), mostradas na Figura 14.

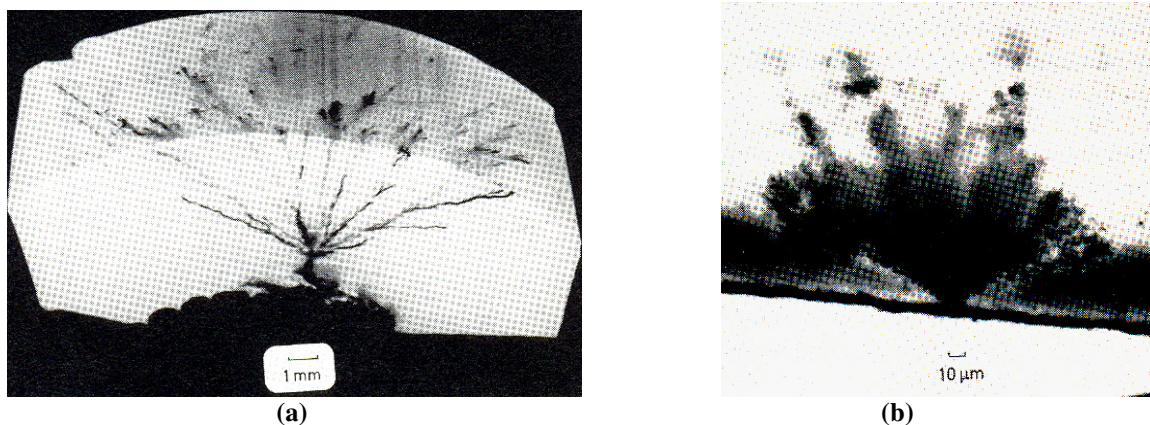


Figura 14. Exemplos de árvore elétrica e arborescência. (a) Árvore elétrica gerada em um cabo de polietileno em testes de corrente contínua. (b) Típica arborescência em água em um cabo de polietileno. (DISSADO; FOTHERGILL, 1992).

As árvores elétricas podem ser geradas por tensões em torno de 3kV, com valores de campo elétrico superiores a 300 kV/mm. São estruturas escuras, com aspecto de um arvoredor, possuindo canais conectados entre si, de poucos micrômetros de diâmetro e algumas dezenas de micrômetros de comprimento. Estes canais nem sempre estão

carbonizados, apenas fracamente condutivos. No caso das árvores se expandirem pelo isolante, pode ocorrer um curto circuito, mas isto nem sempre acontece de imediato. Entretanto, é possível que uma disrupção seja iniciada antes das árvores atravessarem por completo o material isolante. Desta forma, pode-se dizer que as árvores elétricas contribuem para o dano acumulativo do isolante que está sob tensão elétrica, aumentando a probabilidade de falha do material (DISSADO; FOTHERGILL, 1992).

As arborescências em água são estruturas difusas, lembrando um leque, que se desenvolvem nos polímeros sob a ação combinada de água (vapor) e um campo elétrico aplicado (PIAZZA et al., 2000; TANAKA, 2001). Relacionam-se com a difusão de umidade ou vapor de água pelo dielétrico, comum aos materiais poliméricos, que apesar da aparência consistente e da baixa permeabilidade, têm essa característica. As arborescências ocorrem sob ação de campos elétricos com intensidades muito menores do que aqueles necessários para a formação de árvores elétricas, tendo sido registrado na literatura valores de campo em torno de 1,9 kV/mm; no entanto, a ruptura do material ocorre ao longo de seu processo de envelhecimento, em torno de anos, dependendo do tipo de polímero (DISSADO; FOTHERGILL, 1992; DUARTE, 2001).

2.6 Mecanismos de degradação fotoquímica em materiais poliméricos

Escudos balísticos confeccionados em material polimérico estão susceptíveis à deterioração de suas propriedades pela ação dos raios UV provenientes do sol durante sua vida útil. A energia absorvida na região ultravioleta do espectro eletromagnético (190–400 nm) 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 PC (RAMANI; RANGANATHAIAH, 2000; GERETOVSZKY et al., 2002). Segundo Araújo (1993), as reações fotoquímicas ocorrem nos grupos cromóforos (absorvedores de UV) das moléculas dos aditivos que compõem o polímero e garantem a proteção do polímero contra a degradação solar.

A radiação UV tem energia suficiente para romper as ligações do polímero e produzir radicais livres. Estes radicais podem iniciar, mais adiante, reações como reticulações (*crosslinking* ou ligações cruzadas, aumentando o peso molecular do polímero) e cisões de cadeia (*scission chain*, que reduzem o peso molecular), ou ainda a formação de compostos ou duplas ligações. Essas reações causam alterações nas propriedades físicas, mecânicas e na microestrutura do material (ARAÚJO, 1993; RAMANI; RANGANATHAIAH, 2000).

Atualmente, as chapas de PC disponíveis no mercado nacional contêm aditivos UV nos primeiros 100 µm da superfície, que garantem 10 anos contra o amarelamento causado pela exposição do produto aos raios solares (GE PLASTICS, 2005). Do mesmo modo, as resinas epoxídicas comerciais também possuem aditivos UV visto que o compósito epóxi é bastante utilizado como constituintes de pás de turbinas eólicas, cascos de embarcações, carcaças de canhões de guerra, etc.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 15 apresenta um esquema simplificado dos passos percorridos para atingir o objetivo deste trabalho.

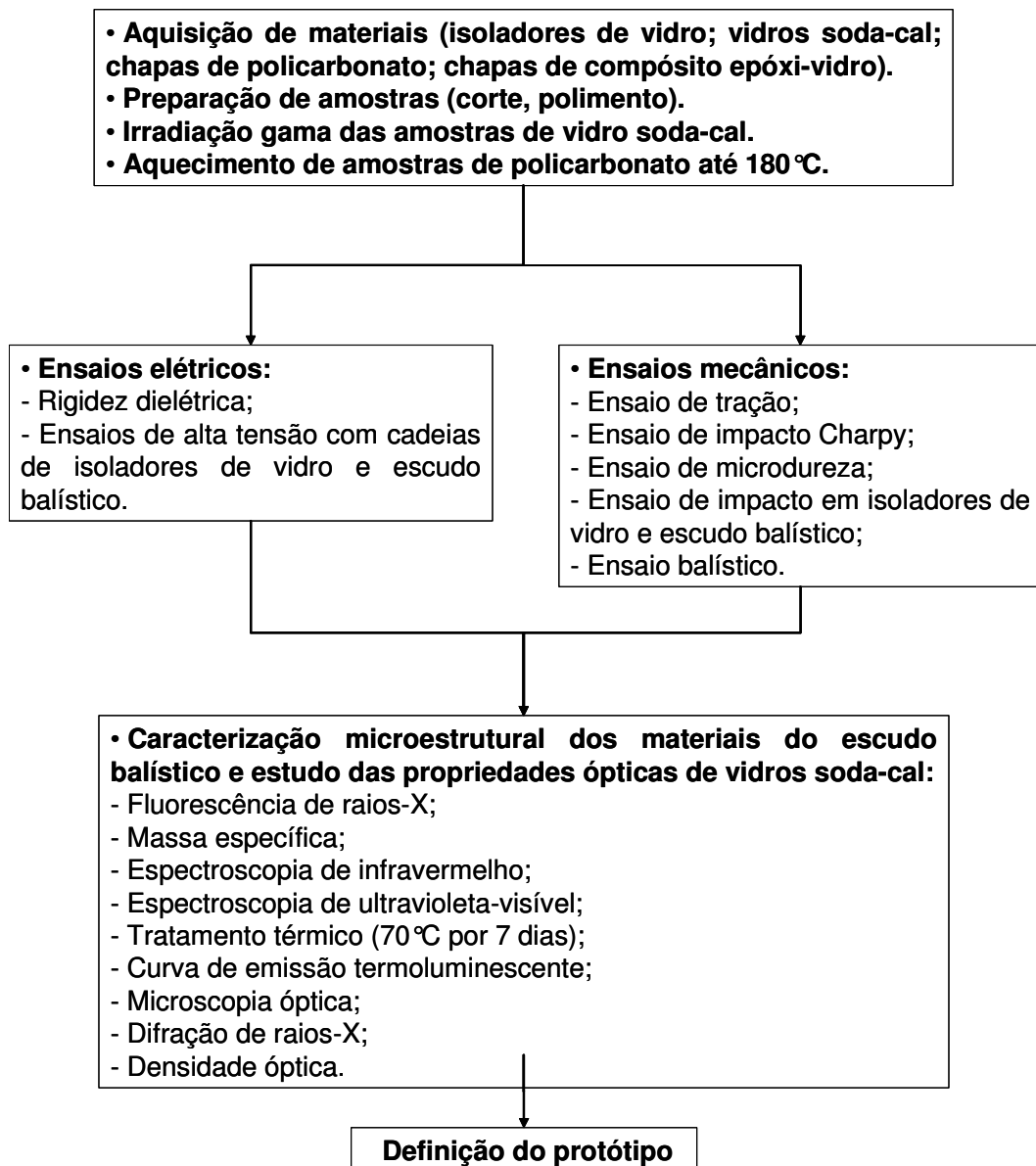


Figura 15. Esquema do procedimento experimental utilizado neste trabalho.

3.1 Materiais e preparação de amostras

3.1.1 Vidros soda-cal

Para o estudo das propriedades ópticas do vidro soda-cal, as amostras foram obtidas do mesmo fornecedor dos isoladores de vidro da CHESF, garantindo dessa forma a similaridade na composição química. As amostras foram cortadas nas dimensões de 18 mm de diâmetro, polidas com carbetto de silício e pó de alumina para obter a espessura final de 5 mm.

Os isoladores de vidro utilizados neste trabalho foram doados pela CHESF, modelo concha-bola (próprio para linhas de 230 kV, Tabela 1), estando usados, porém estruturalmente íntegros.

3.1.2 Critérios para seleção dos materiais do escudo balístico

Foram listadas as funções que o escudo balístico deve atender, chamadas fatores críticos de sucesso do produto, apresentadas abaixo em ordem decrescente de importância:

- a) resistência mecânica, em especial resistência ao impacto de projéteis, principalmente armas de fogo. A resistência ao impacto representa a tenacidade à fratura do material, isto é, a quantidade de energia mecânica absorvida antes da fratura;
- b) propriedades dielétricas, como resistência ao arco elétrico, que pode ser medida por ensaios de tensão disruptiva e determinação da rigidez dielétrica do material;

- c) poder extintor de fogo, isto é, auto retardante de chamas, em caso de uma combustão devido à descarga elétrica;
- d) propriedades térmicas, devendo o material suportar altas temperaturas e manter boa estabilidade dimensional, uma vez que o escudo ficará exposto à radiação solar durante a maior parte de sua vida útil;
- e) durabilidade e resistência a intempéries, principalmente contra chuva, salinidade, poluição e raios UV, que provocam reações químicas, oxidação, mudança na coloração, surgimento de fissuras, rachaduras, etc;
- f) baixa densidade, para não sobrecarregar a sustentação mecânica da estrutura metálica da LT;
- g) ecologicamente correto, que não cause impacto ambiental, nem seja tóxico;
- h) baixo custo, a fim de que a fabricação do escudo seja economicamente viável;
- i) facilidade de aquisição, de preferência com fornecedor no mercado nacional;
- j) facilidade de processamento e usinabilidade, para se obter geometria adequada do escudo;
- k) estético, de coloração discreta para não despertar ainda mais a atenção de vândalos.

Considerando as funções acima, optou-se por estudar o policarbonato e o compósito epóxi-vidro como materiais para a confecção do escudo balístico.

3.1.3 Compósito epóxi-vidro

O material compósito foi adquirido de uma empresa fabricante de pás para turbinas eólicas, localizada em Sorocaba-SP. O processo de fabricação utilizado para confeccionar as chapas planas foi o de infusão a vácuo com matriz epóxi e reforço de fibras

de vidro do tipo UD (unidirecional, 970 g/m²) e BIAx (biaxial, 800 g/cm²). Para o estudo das propriedades mecânicas e da microestrutura do compósito, as amostras tiveram as espessuras ajustadas com papel abrasivo n° 600 e polimento superficial com carbetto de silício e pó de alumina.

3.1.4 Policarbonato

O PC utilizado foi o Lexan® da GE, adquirido nas espessuras de 3mm, 6mm e 8 mm, em forma de chapas planas. Foram estudadas amostras de PC íntegro e com bolhas, sendo estas produzidas por aquecimento em forno elétrico (Nevoni NV 1.4) a partir da temperatura ambiente até 180°C; ao atingir tal temperatura, o forno foi desligado para resfriamento espontâneo das amostras até o restabelecimento da temperatura ambiente.

3.2 Ensaios elétricos

3.2.1 Rigidez dielétrica

Os ensaios para determinação da rigidez dielétrica das amostras de PC e compósito epóxi-vidro foram conduzidos em um equipamento para teste de óleos isolantes modelo DTA 100E da BAUR do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LABEND-UFPE),

utilizando óleo de silicone como meio circunvizinho (Figura 16), uma vez que o óleo de silicone possui ponto de chama acima de 300°C e elevada estabilidade química, baixo envelhecimento e repelência à água (SCHMIDT, 1986). As medidas foram tomadas em frequência industrial (60 Hz), temperatura ambiente (~22°C), com eletrodos do tipo bolas ($\varnothing = 12,5$ mm), taxa de crescimento da tensão de 0,5 kV/s, método de aplicação da tensão tipo *short-time* de acordo com norma ASTM D149-97a. Para o cálculo da rigidez dielétrica, a espessura de cada amostra ensaiada foi medida com um micrômetro digital no ponto em que ocorreu a ruptura elétrica. As amostras foram preparadas em forma de placas quadradas com 60 mm de lado e espessura média de 3 mm.

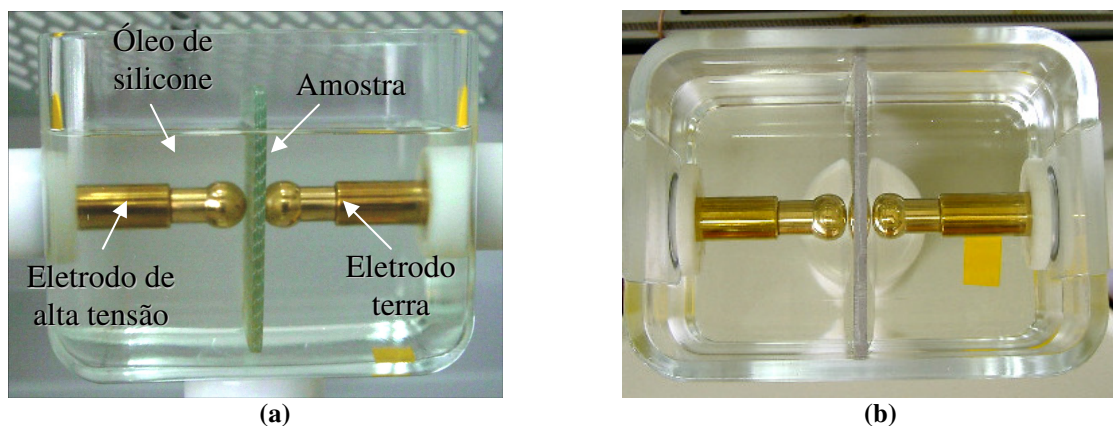


Figura 16. Configuração do ensaio de rigidez dielétrica. (a) Vista frontal, amostra de compósito, eletrodos do tipo bolas. (b) Vista superior, amostra de PC íntegro.

3.2.2 Ensaio de alta tensão

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, como também ensaios de tensão em frequência industrial (60 Hz) até 800 kV. O objetivo do experimento foi avaliar a performance elétrica do escudo de PC numa

cadeia de isoladores de vidro típica de linhas de 230 kV. Os valores de tensão disruptiva foram medidos em frequência industrial (média de 5 medições), correspondendo à condição normal de funcionamento da LT. Também foram realizados ensaios de tensão disruptiva sob impulso de manobra com polaridades negativa e positiva (média de 20 medições para cada tipo), os quais simulam o surto de tensão na LT (condição mais severa). O experimento foi conduzido segundo a norma NBR 6936 (Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão, abril/1992). Foram utilizados 16 isoladores de vidro, secos e sem poluição, dispostos em uma cadeia vertical, dos quais 7 eram íntegros e 9 quebrados, o que corresponde à condição de isolamento mínimo (crítico) para uma linha de 230kV. Os 7 isoladores inteiros foram posicionados na cadeia segundo dois arranjos distintos: (1) uniformemente distribuídos ao longo da cadeia, (2) posicionados consecutivamente ao longo da cadeia. Estes dois arranjos foram ensaiados inicialmente sem escudos, sendo depois testados com dez placas de PC (300 x 300 x 6 mm³, furo central de 63 mm para o encaixe no pino do isolador), instaladas nos primeiros isoladores da cadeia (superiores), conforme mostrado na Figura 17. Os ensaios foram feitos em temperatura ambiente (~ 20°C), pressão de 703 mmHg e umidade relativa do ar próxima de 70%. Devido às diferentes condições atmosféricas, os valores de tensão obtidos experimentalmente foram corrigidos para os valores de referência, de acordo com norma NBR 6936 de 1992.



Figura 17. Configurações do ensaio de alta tensão. (#1) Arranjo n° 1. (#1pc) Arranjo n° 1 com escudos de PC. (#2) Arranjo n° 2. (#2pc) Arranjo n° 2 com escudos de PC.

3.3 Ensaios mecânicos

3.3.1 *Ensaio de tração*

O ensaio de tração utilizou a máquina universal de ensaios EMIC DL10000 do LABEND-UFPE, com velocidade de aplicação da carga de 1 mm/min, comprimento útil dos corpos de prova de 80 mm. Para o PC íntegro, as dimensões da seção transversal foram 13 x 8 mm²; para o PC aquecido foram 16 x 9 mm². Os corpos de prova de compósito epóxi-vidro tiveram seção transversal medindo 13 x 3 mm².

3.3.2 *Ensaio de impacto Charpy*

O ensaio de impacto com pêndulo foi realizado em temperatura ambiente (~25°C) pelo método Charpy, no Laboratório de Mecânica Aplicada da UFPE com um martelo pendular, marca ReneGraf. Os corpos de prova foram cortados nas dimensões de 100 x 10 x 8 mm³, sem entalhe. Para ensaiar o material compósito epóxi-vidro foram preparados dois tipos de corpos de prova, um com as fibras longitudinais e outro com as fibras transversais ao seu comprimento.

3.3.3 Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza nas amostras de PC e compósito foi realizado no microdurômetro Shimadzu HMV-2 (LABEND-UFPE), utilizando um identador Vickers com ponta de diamante piramidal de 136° . As cargas aplicadas foram de 10g a 100g, tempo de aplicação da carga de 30 s, cinco medições para cada carga. O método utilizado para calcular a microdureza foi através da medição do comprimento das diagonais identadas, usando a régua eletrônica acoplada ao equipamento e lente objetiva de magnificação de 40X.

3.3.4 Ensaio de impacto em isoladores de vidro e escudo balístico

O ensaio de impacto com pêndulo em prensa hidráulica foi conduzido para estimar a energia de impacto necessária para quebrar um isolador de vidro com e sem escudos, já que o ensaio de impacto Charpy, por utilizar corpos de prova padronizados, não oferece informações sobre o desempenho do material nas condições de uso (produto).

Este experimento utilizou um dispositivo de tração (Figura 18) construído no LABEND-UFPE, que fixa o isolador de vidro na prensa e ao mesmo tempo converte a carga vertical aplicada pela máquina (2 toneladas) em um esforço horizontal de tração, simulando os esforços de tração a que um isolador elétrico normalmente se submete durante seu funcionamento nas LT's. O dispositivo permite ensaiar até dois isoladores em cadeia. Para o impacto, foi utilizado um pêndulo que promove o impacto na amostra ao cair livremente de

uma altura conhecida, A área de contato do pêndulo pôde ser alterada uma vez que sua ponta é rosqueável e pode ser substituída quando desejável.

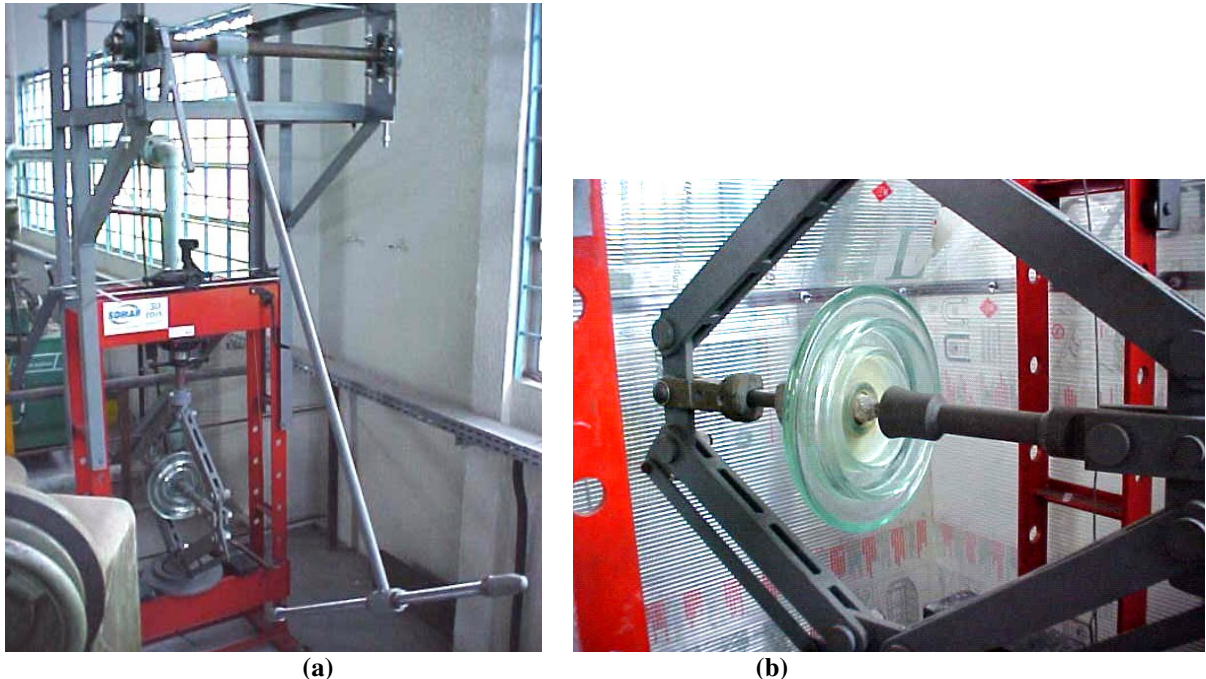


Figura 18. Equipamento para ensaio de impacto com pêndulo em isoladores de vidro. (a) Isolador posicionado e pêndulo em elevação. (b) Detalhe do isolador de vidro preso no dispositivo de tração.

O equipamento permite que o impacto ocorra na face inferior ou superior do disco de vidro do isolador, com ângulo de incidência possível de ser variado, já que a base do dispositivo de tração pode ser rotacionada de 0° a 75° em torno do eixo vertical. Há uma proteção de PC ao redor da prensa hidráulica para proteger o usuário durante o experimento, pois o vidro temperado, ao ser quebrado, estilhaça-se em pequenos fragmentos cortantes.

Foram utilizados dois tipos de ponta do pêndulo, com diâmetros de 5 mm e 10 mm cada um. A massa inicial do pêndulo é de 9 kg e foi aumentada com a colocação de discos metálicos (halteres) totalizando 21 kg, altura de queda de 0,75–2,50 m, ângulo de impacto de 45° em relação ao plano da superfície do disco de vidro do isolador, sendo o

impacto na face inferior do disco. Foram testados escudos de PC de formato quadrado com 300 mm de lado e espessuras variáveis (3 – 6 mm).

3.4 Ensaio balístico

O ensaio balístico foi realizado com cadeias de 4 e 5 isoladores de vidro íntegros, dispostas horizontalmente em uma estrutura de sustentação metálica, e serviram para avaliar a performance mecânica dos escudos numa condição mais severa que os ensaios de impacto laboratoriais.

O experimento ocorreu no *stand* de tiros do Caxangá Golf Club em Recife-PE, conduzido pelo Tenente Coronel da Força Aérea e instrutor de tiros Sr. Teruo Anabuki. Os escudos testados foram de PC compacto (6mm de espessura) e compósito epóxi-vidro (3 mm e 10 mm de espessura, tecido de vidro biaxial 800 g/m²) em formato quadrado com 300 mm de lado e orifício central de 33 mm de diâmetro para serem encaixados nos pinos dos isoladores (Figura 19). A distância entre o atirador e o alvo foi de 14 metros.



Figura 19. Configurações do ensaio balístico. (a) Cadeia com 5 isoladores de vidro e escudos de PC. (b) Atirador posicionado para o disparo.

Os testes tiveram como alvo o primeiro isolador da cadeia. Os tiros foram disparados na direção perpendicular à superfície do escudo. Para cada tiro, os danos causados nos escudos e a integridade dos isoladores foram observados. Após a quebra do primeiro isolador, o teste foi continuado até a quebra do segundo isolador e assim por diante. Ao ser atingido o limite de quebra, a arma era trocada por outra de diferente poder de fogo. Foram utilizados: revólver calibre 38 (munição com 0,38” de diâmetro; líder de vendas no Brasil), pistola Glock calibre 38, pistola Glock calibre 45, carabina Puma calibre 38 (muito usada em caça e tiro desportivo) e revólver Magnum calibre 44.

3.5 Ensaio de radiografia computadorizada no compósito epóxi-vidro

O ensaio de radiografia computadorizada no material compósito utilizou um equipamento portátil com fonte de raios-X de 270 kVp (LABEND-UFPE), um filme flexível IP (*Imaging Plate*, tipo SR *super resolution*, da FujiFilm), um *scanner* para fazer a leitura do filme radiografado e ainda um *eraser* para “apagar” o filme reutilizável. A distância entre a fonte e o filme foi de 60 cm, o tempo de exposição foi de 10 s e o tempo de leitura do filme no *scanner* foi de 10 minutos, conforme mostrado na Figura 20. As imagens digitais tiveram qualidade ajustada para 600 dpi e o seu processamento foi feito em software comercial VixWin2000. A amostra radiografada foi cortada nas dimensões: 140x140x15 mm³.

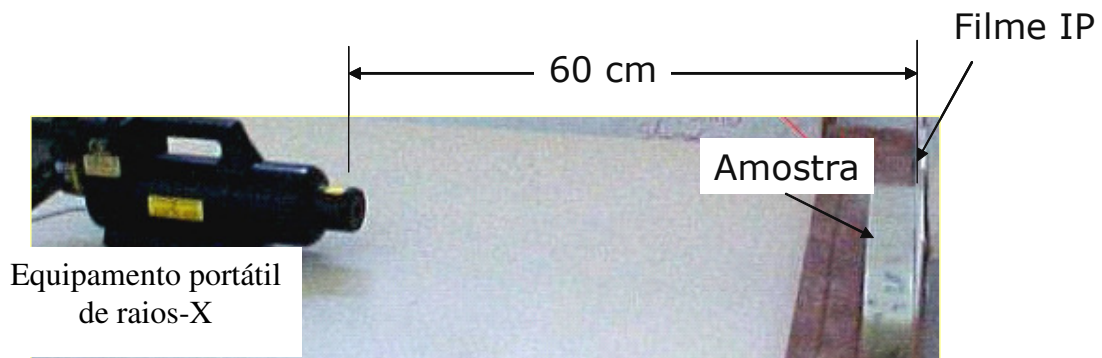


Figura 20. Configuração do ensaio de radiografia computadorizada em material compósito.

3.6. Medidas de densidade

A densidade foi medida na balança analítica Sartorius CP225D (LABEND-UFPE), utilizando o método de Arquimedes, com base na Equação 5, onde ρ é a densidade da amostra (g/cm^3), $\rho(fl)$ é a densidade do líquido de imersão na temperatura do ensaio (g/cm^3), $W(a)$ é a massa da amostra medida no ar (g) e $W(fl)$ é a massa da amostra medida no líquido de imersão (g). Neste ensaio, utilizou-se como líquido de imersão o álcool isopropílico de alta pureza (PA, 99,5%), temperatura do ensaio em torno de 23°C . O valor tabelado de $\rho(fl)$ para o álcool isopropílico a 23°C é de $0,79 \text{ g/cm}^3$ (SARTORIUS, 2001).

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(fl)}{W(a) - W(fl)} \quad (5)$$

3.7 Irradiação gama

A irradiação gama nas amostras de vidro soda-cal sílica foi conduzida em temperatura ambiente ($\sim 22^{\circ}\text{C}$) pela Empresa Brasileira de Radiações (EMBRARAD) em São Paulo, no irradiador JS 7500 MDS Nordion, fonte de ^{60}Co , atividade nominal de $23,31 \times 10^{15}$ Bq (0,63 M Ci), taxa de dose de 1,8 kGy/h (data: 17/09/2005). Foram utilizadas treze doses de irradiação (0,5 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 30 – 50) medidas em kGy, sendo três amostras para cada dose. O *fading* foi monitorado do 13° ao 440° dia após a irradiação, totalizando cerca de 1 ano e 2 meses.

Para a obtenção da curva de emissão termoluminescente (TL), as amostras de vidro foram irradiadas no irradiador Gammacell 220 Excel (DEN-UFPE), fonte de ^{60}Co , taxa de dose de 8,8 kGy/h (data: 12/03/2007), tempo de exposição de 13 minutos, dose de 2 kGy.

As curvas de emissão termoluminescente (TL) dos vidros soda-cal sílica foram obtidas no equipamento Harshall (DEN-UFPE), taxa de 4°C/s , faixa de $60\text{--}450^{\circ}\text{C}$, atmosfera de nitrogênio, amostras com massa média de 1,0 mg.

A densidade óptica das amostras de vidro foi medida com o densitômetro digital MRA do Laboratório de Dosimetria e Instrumentação (DEN-UFPE).

3.10 Análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial

A análise térmica do PC e do compósito epóxi-vidro foi realizada por análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial simultâneos (TGA-DSC) para

determinar algumas propriedades físicas do PC e do compósito em função da temperatura, como temperaturas de transição vítrea (T_g) e de fusão (T_m) e perda de massa (estabilidade térmica).

As medidas foram obtidas no equipamento Netzsch (STA 409) da FEM-UNICAMP-SP, com termopar tipo S (Pt90%Rh10%-Pt100%); utilizou-se cadinho de alumina vazio como referência, atmosfera de nitrogênio (vazão de 60 ml/min), amostras sólidas com massa inicial de 20 a 80 mg, taxa de aquecimento de 10°C/min, intervalo de temperatura de 30 – 500°C.

3.11 Microscopia óptica

As observações microscópicas foram realizadas no microscópio óptico Olympus BX51 (LABEND-UFPE), para avaliar o acabamento superficial das amostras preparadas, bem como o tratamento térmico das amostras de PC, as regiões perfuradas após os ensaios de rigidez dielétrica e as identações de microdureza Vickers.

3.12 Difração de raios-X

A difração de raios-X (DRX) foi realizada no difratômetro Shimadzu XRD 6000 (LABEND-UFPE) com alvo de cobre, 40 kV, 30 mA, velocidade de varredura de 2 graus/min, ângulo de difração medido na faixa de 3–80 graus.

3.13 Fluorescência de raios-X

A análise química das amostras foi determinada por fluorescência de raios-X (FRX) no espectrofotômetro Rigaku RIX 3100 da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (FEM-UNICAMP-SP), utilizando alvo de ródio, 60 kV, 25 mA, método de Parâmetros Fundamentais.

3.14 Espectroscopia de ultravioleta-visível e infravermelho

Os espectros de ultravioleta-visível (UV-Vis) e infravermelho do PC e compósito epóxi-vidro foram obtidos no espectrofotômetro Perkin-Elmer Lambda 9 do Instituto de Física da UNICAMP-SP, na faixa de 200–3200 nm, *background* no ar. O espectrofotômetro Perkin-Elmer Lambda 6 da Central Analítica do Departamento de Química Fundamental da UFPE foi utilizado para medidas no vidro soda-cal, faixa de 190–900 nm, *background* no ar.

Os espectros de infravermelho foram obtidos no espectrômetro ABB FTLA 2000 (LABEND-UFPE), na faixa de 8000-400 cm^{-1} , resolução de 4 cm^{-1} , 200 varreduras, temperatura ambiente ($\sim 23^\circ\text{C}$) e 57% de umidade relativa do ar. Para as amostras de vidro do isolador elétrico (espessura em torno de 5 mm) e de compósito epóxi-vidro (espessura próxima de 1mm) foi utilizado o método de transmissão com *background* no ar. Para as amostras de PC foi utilizado o método de refletância difusa (DRIFTS) com amostra em forma de pó e *background* com brometo de potássio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tratamento térmico do PC

Após o tratamento térmico, as amostras de PC apresentaram inúmeras bolhas no seu interior; o tamanho e concentração das bolhas no volume do material parecem estar diretamente relacionados à espessura do material e à temperatura de aquecimento (Figura 21). As bolhas formadas possuíram tamanhos diversos, com diâmetro de 100 a 200 μm .

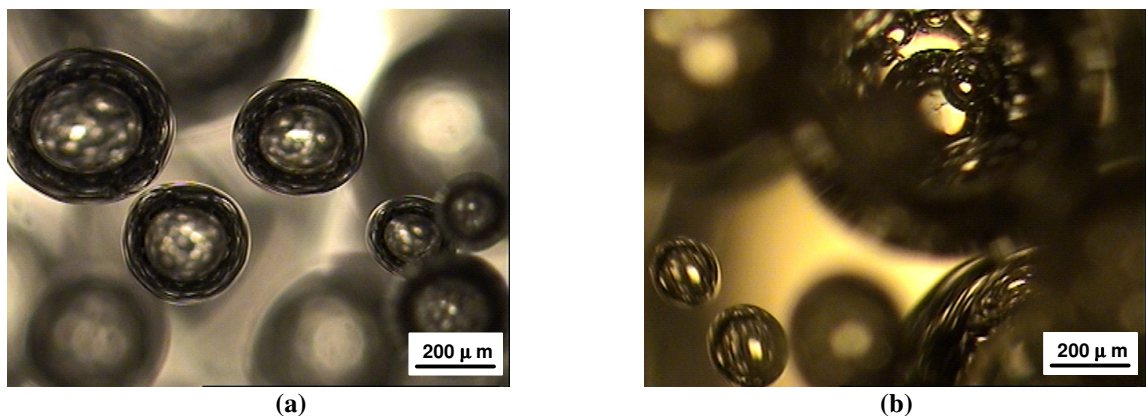


Figura 21. Imagens de microscopia óptica em amostras de PC aquecidas. (a) 180°C. (b). 250°C.

Não foi verificado amarelamento do material quando aquecido até 180°. As bolhas ficaram confinadas no interior dos corpos de prova, mantendo lisa sua superfície provavelmente devido à ação da tensão superficial (viscosidade menor). Por conta disso, as amostras de PC tratadas termicamente foram chamadas de “PC com bolhas”.

4.2 Ensaios elétricos

4.2.1 Rigidez dielétrica e caracterização da homogeneidade do material

Após a ocorrência da primeira ruptura elétrica, o arco elétrico perfurou as amostras deixando uma carbonização pontual visível ao olho humano. A Tabela 4 apresenta os valores de rigidez dielétrica obtidos experimentalmente.

Tabela 4. Valores experimentais do ensaio de rigidez dielétrica.

Material	Rigidez dielétrica (kV/mm)	
	Medição n° 1	Medição n° 2
PC íntegro	22,3 ± 0,5	14,4 ± 1,7
PC com bolhas	20,9 ± 0,6	9,1 ± 2,0
Compósito epóxi vidro	17,6 ± 0,3	10,1 ± 1,8

Os resultados indicam que a rigidez dielétrica do PC íntegro foi maior em comparação ao PC com bolhas e ao compósito epóxi-vidro. Na segunda medição, os valores de rigidez dielétrica foram inferiores aos da primeira medida pelo fato das amostras já estarem perfuradas; a segunda ruptura aumentou o tamanho da carbonização. O PC com bolhas apresentou redução de cerca de 6% no valor médio da rigidez dielétrica em relação ao material íntegro, o que representa uma pequena variação se comparada ao erro experimental (cerca de 3% e 22% respectivamente para a primeira e segunda medições do PC com bolhas).

As regiões perfuradas pela ruptura elétrica foram observadas por microscopia óptica para melhor esclarecer os valores de rigidez dielétrica obtidos experimentalmente (Figuras 22 e 23).

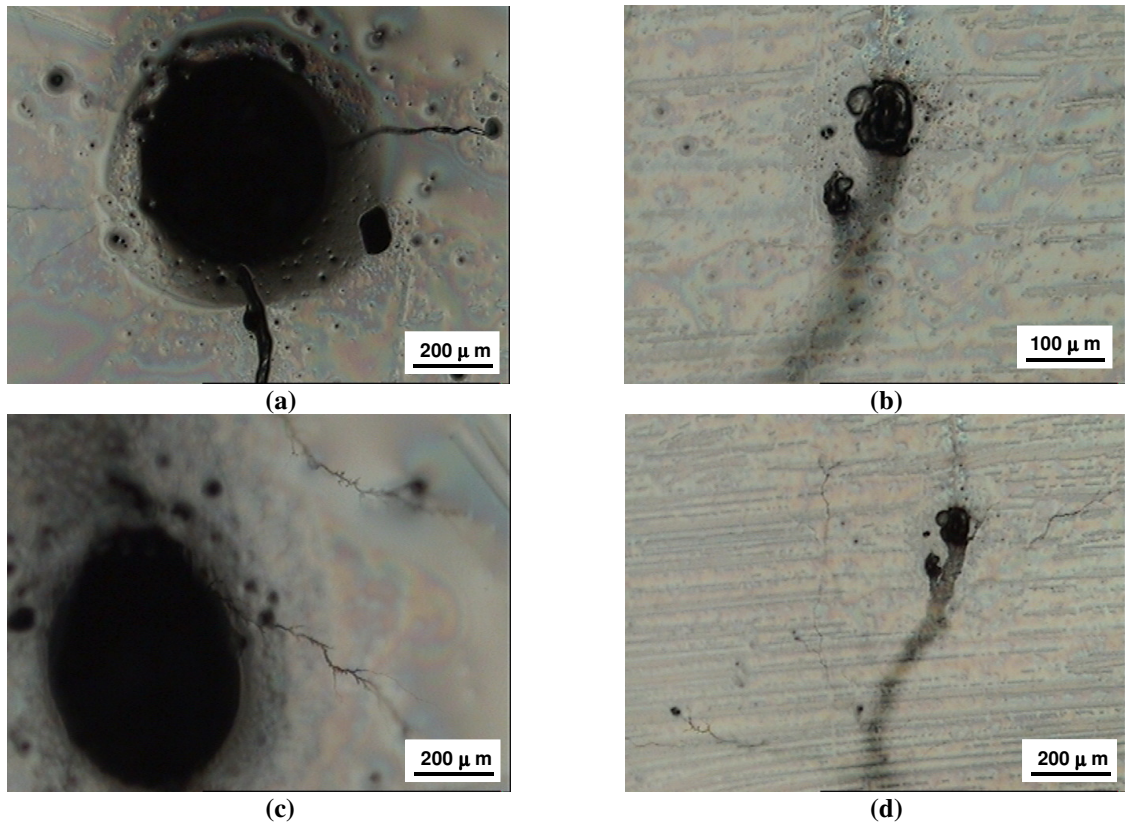


Figura 22. Imagens de microscopia óptica de amostras de PC íntegro mostrando as regiões perfuradas pela descarga elétrica e a formação de árvores elétricas.

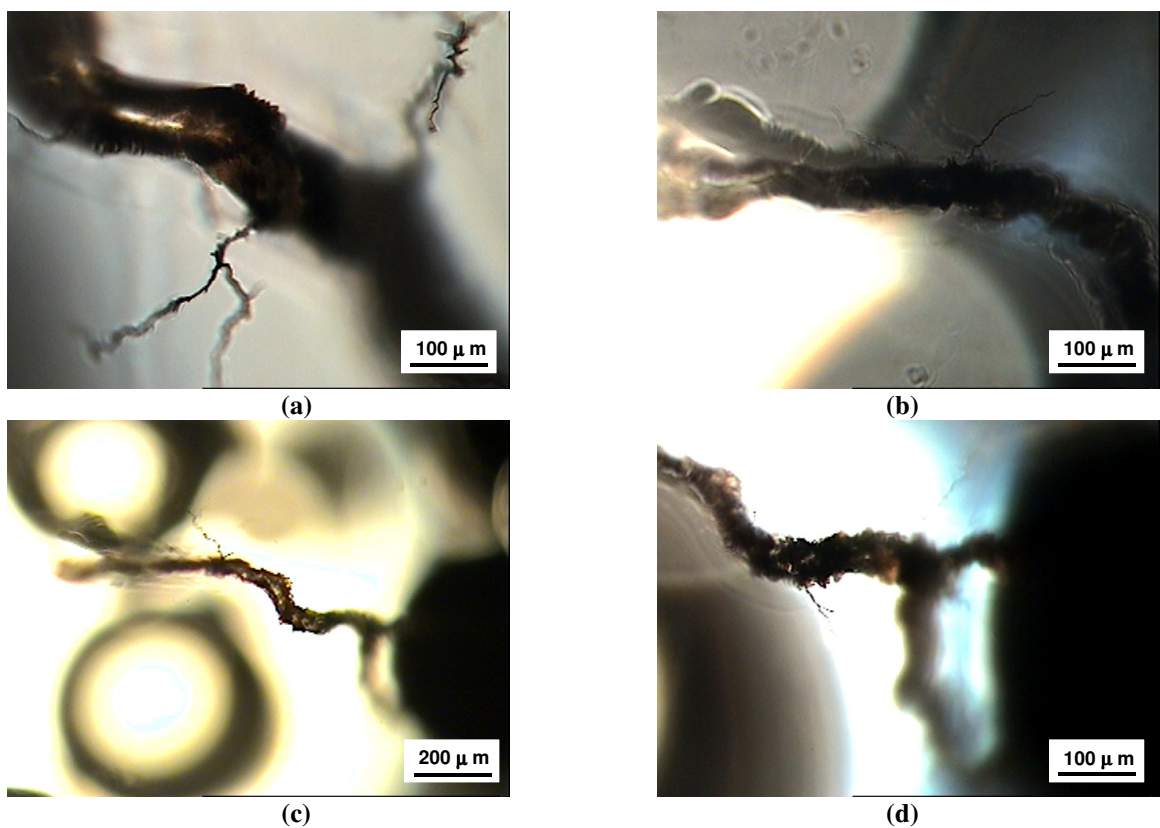


Figura 23. Imagens de microscopia óptica de amostras de PC com bolhas. Caminho carbonizado da descarga elétrica e formação de árvores elétricas.

Observa-se pelas imagens microscópicas que as regiões perfuradas possuem diâmetro próximo de 100 μm e são caracterizadas por uma carbonização pontual. Em todas as amostras ensaiadas, árvores elétricas foram encontradas próximas ao local da ruptura, possuindo estruturas escuras com aspecto de um arvoredo, com canais conectados entre si, de poucos micrômetros de diâmetro e algumas dezenas de micrômetros de comprimento. Verifica-se que a ruptura elétrica percorreu um caminho entre as bolhas do PC aquecido a 180°C, sugerindo que o interior das bolhas contenha alta rigidez dielétrica; esta análise não foi observada neste trabalho, mas sugere-se o uso da cromatografia gasosa para tal investigação.

Para o compósito epóxi-vidro a carbonização foi localizada próxima às linhas de costura do tecido de vidro feitas de poliéster (Figura 24), provavelmente devido à presença ar entre as mesmas. As linhas de poliéster são usadas nos tecidos de vidro para unir as fibras e são visíveis ao olho humano tanto no tecido seco quanto no produto acabado. A rigidez dielétrica da fibra de vidro é acima de 35 kV/mm e por ser superior à dos demais constituintes do compósito – sendo 3 kV/mm para o ar; 16,5 kV/mm para o poliéster; 15–20 kV/mm para o epóxi (DISSADO; FOTHERGILL, 1992; ALBUQUERQUE, 1999) – pode-se inferir que a matriz epóxi e a região das linhas de costura são as regiões mais fáceis de serem perfuradas e o valor da rigidez dielétrica do compósito torna-se dependente do valor de ruptura elétrica desses materiais.

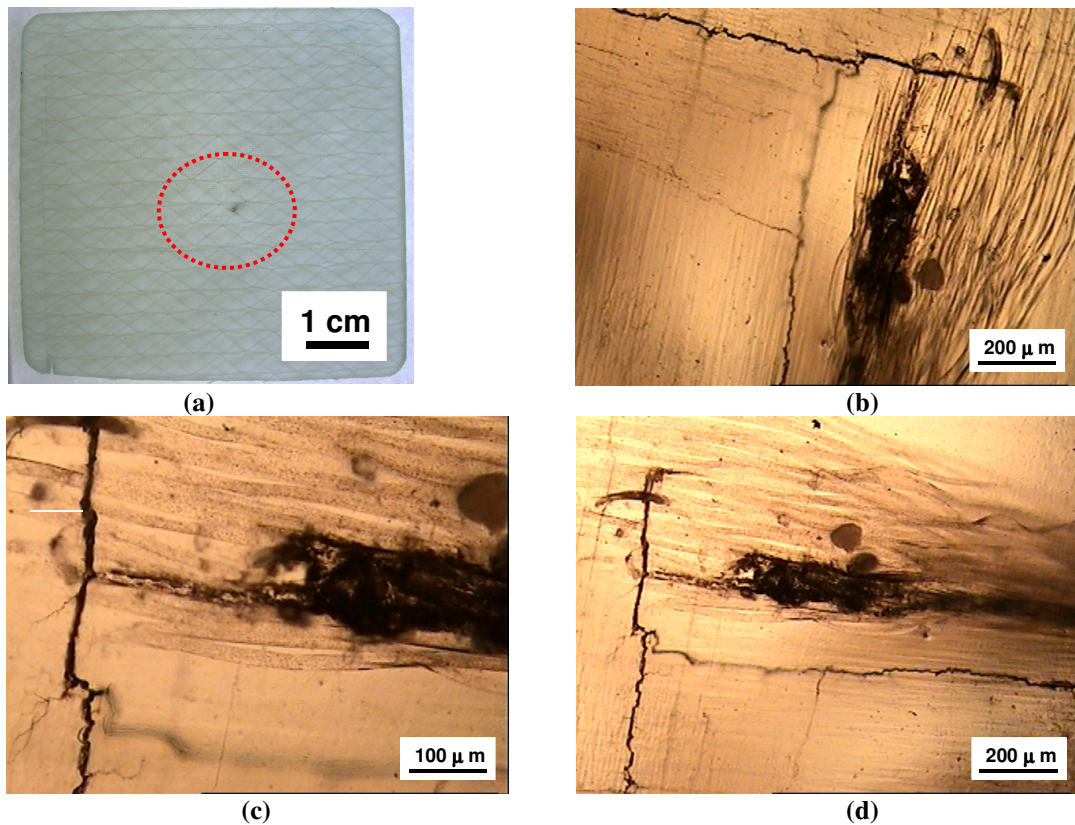


Figura 24. Perfuração elétrica no compósito epóxi-vidro após ensaio de rigidez dielétrica. (a) amostra perfurada. (b), (c) e (d) Imagens de microscopia óptica da região carbonizada próxima à linha de costura do material e formação de árvores elétricas.

Esses resultados demonstraram que a rigidez dielétrica é bastante sensível às linhas de costura e bolhas das amostras estudadas. De fato, as propriedades dielétricas dos materiais são dependentes da microestrutura e por isso defeitos (como porosidades, vazios, bolhas e trincas) influenciam não apenas as propriedades mecânicas do material como também suas propriedades dielétricas.

4.2.2 Ensaio de alta tensão

A Figura 25 mostra os resultados obtidos no experimento de alta tensão. O arranjo n°2, que possui os isoladores íntegros distribuídos uniformemente ao longo da cadeia,

apresentou os maiores valores de tensão disruptiva em relação ao arranjo nº 1, tanto em frequência industrial como sob impulso de manobra.

Sob impulso de manobra, observou-se um aumento nos valores de tensão disruptiva em relação aos ensaios em frequência industrial, já que nesta condição está sendo simulado um surto de tensão na cadeia (uma condição especial e mais severa de ocorrência de descarga elétrica).

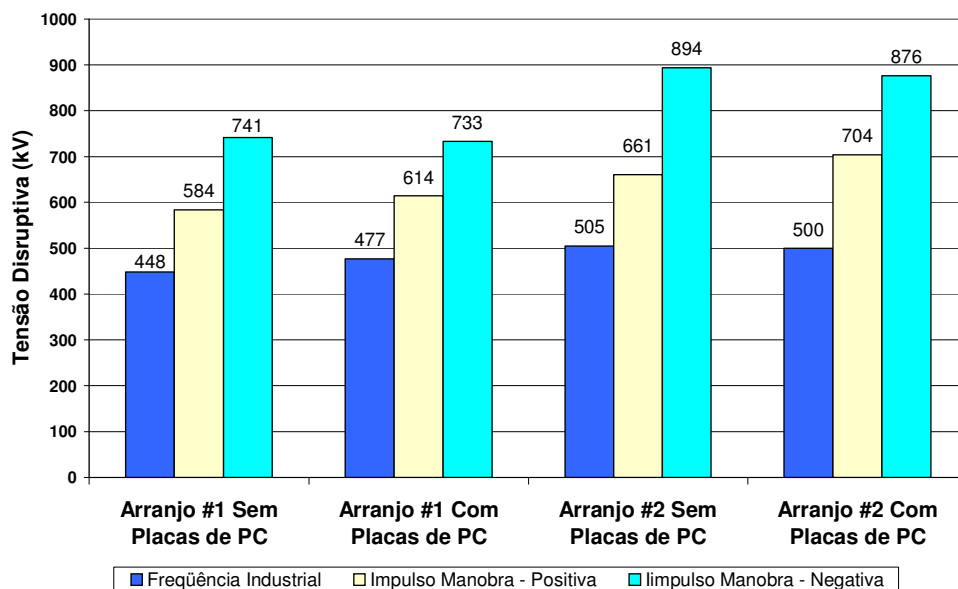


Figura 25. Resultados do ensaio de alta-tensão.

A colocação de escudos de PC nos isoladores de vidro não alterou os valores de tensão disruptiva da cadeia, e as variações estão dentro do erro experimental de 7%.

Como já apresentado no capítulo 2, na condição de isolamento mínimo existem arranjos (como o de nº 2 experimentado neste trabalho) que oferecem maior resistência ao arco elétrico, cujos isoladores ocupam posições estratégicas. Estes resultados mostram, então, que para uma linha de 230 kV pode-se utilizar escudos balísticos em quantidade reduzida de maneira a proteger apenas os isoladores estratégicos.

A Figura 26 exibe fotografias do momento da ocorrência da descarga elétrica. Observa-se que o caminho percorrido pelo arco elétrico é maior no arranjo nº2. Como a tensão disruptiva é diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos metálicos (lei de Paschen), o maior caminho percorrido pelo arco elétrico no arranjo nº 2 demonstra haver maior distância (*gap*) entre as partes condutivas da cadeia (pino e campânula do isolador) ocasionando um desempenho elétrico superior ao arranjo nº1.

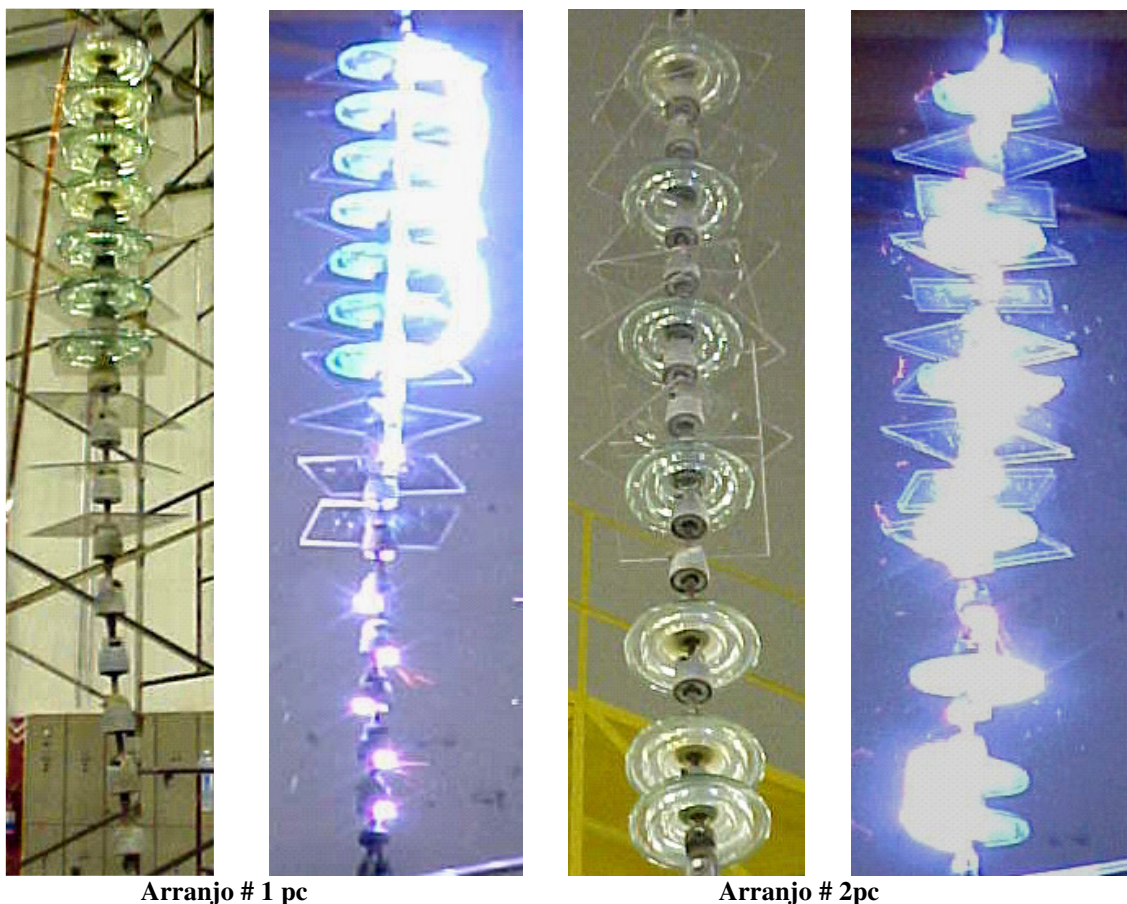


Figura 26. Momento da ocorrência da ruptura elétrica para os arranjos # 1 pc e # 2 pc.

Cerca de três escudos de PC apresentaram sinais de carbonização superficial após os experimentos (Figura 27), em virtude da ocorrência de descargas elétricas durante o experimento de alta-tensão. Ressalta-se que nenhum escudo foi trocado durante as 90 medições. As imagens obtidas por microscopia óptica das regiões carbonizadas (Figura 28)

apontam a existência de canais carbonizados, em aspecto de arvoredo, somente na superfície dos escudos, diferentemente das amostras de rigidez dielétrica, que foram perfuradas. Segundo Dissado e Fothergill (1992) as árvores elétricas são fracamente condutivas, mas contribuem para o dano acumulativo do polímero ao longo dos anos de uso sob ação de um campo elétrico.



Figura 27. Fotografias de alguns escudos de PC que apresentaram sinais de carbonização superficial, após experimentos de alta-tensão.

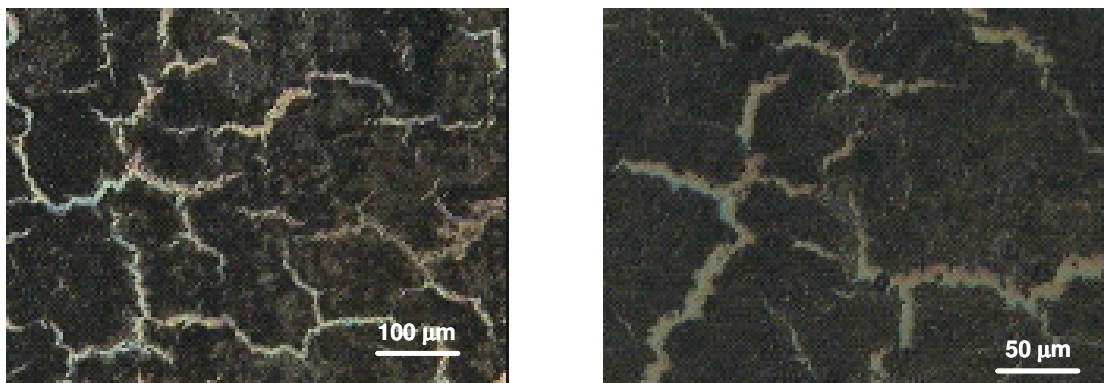


Figura 28. Imagens de microscopia óptica das regiões carbonizadas na superfície de alguns escudos de PC após a realização dos ensaios de tensão disruptiva.

4.3 Ensaios mecânicos

4.3.1 Ensaio de tração

As curvas de tensão-deformação do PC e do compósito epóxi-vidro estão mostradas nas Figuras 29 e 30; os valores médios das características mecânicas desses materiais foram obtidos graficamente e estão apresentados na Tabela 5.

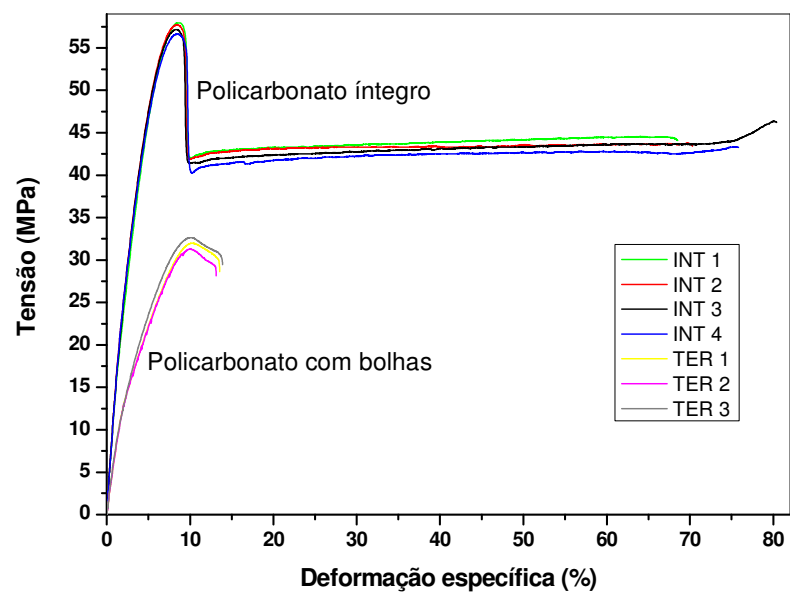


Figura 29. Curvas de tensão-deformação do PC.

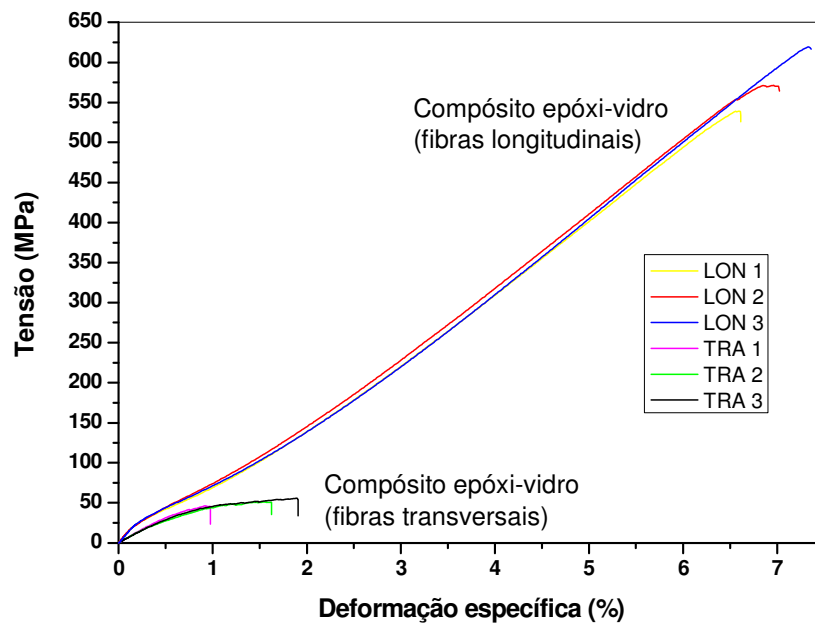


Figura 30. Curvas de tensão-deformação do compósito epóxi-vidro.

Tabela 5. Características mecânicas do PC e compósito epóxi-vidro, obtidas pelas curvas de tensão-deformação do ensaio de tração.

Propriedade	Policarbonato		Compósito epóxi-vidro	
	Íntegro	Com bolhas	Fibras longitudinais	Fibras transversais
Módulo de elasticidade E (MPa)	1447 ± 34	746 ± 21	9400 ± 186	6823 ± 221
Limite de escoamento σ_e (MPa)	57 ± 1	Não há	Não há	Não há
Limite de resistência à tração σ_u (MPa)	57 ± 1	32 ± 1	577 ± 40	51 ± 5
Limite de ruptura σ_r (MPa)	42 ± 2	25 ± 3	561 ± 60	50 ± 5
Módulo de tenacidade U_t (MPa)	3155 ± 215	319 ± 19	1954 ± 231	52 ± 23
Deformação específica na ruptura (%)	$74,0 \pm 5,6$	$13,7 \pm 0,6$	$7,0 \pm 0,4$	$1,7 \pm 0,6$

Para todas as amostras o limite de escoamento, quando existente, coincidiu com o limite de resistência à tração do material e foram superiores aos valores de tensão na ruptura.

O comportamento do PC íntegro foi de um polímero dúctil, iniciando a fase plástica (permanente) em torno de 10% de deformação específica, de acordo com Angelini (1999), e 41 MPa de tensão, evidenciada pelo estiramento no comprimento útil dos corpos de prova. Estes se romperam com 74% de deformação específica média, a maior entre todos os materiais testados, o que significa dizer que o PC íntegro apresentou maior ductilidade. O

módulo de tenacidade médio do PC íntegro também foi superior ao valor médio dos demais materiais, e isto se traduz em maior absorção de energia até a fratura.

O PC com bolhas se comportou como um polímero frágil e quebradiço, rompendo-se após o ponto de escoamento de maneira súbita, sem dar sinais de um rompimento eminente; os corpos de prova não exibiram estricção ou deformação plástica. A deformação máxima atingida pelo material foi cerca de 14%, muito inferior ao do PC íntegro, assim como ocorrido com os limites de resistência à tração e de ruptura, módulo de tenacidade e de elasticidade. Diante disso, pode-se dizer que o tratamento térmico fragilizou o material. Como a temperatura adotada de 180°C é superior a sua temperatura de transição vítrea ($\sim 145^\circ\text{C}$), uma correlação será estudada entre as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente e os resultados de análise térmica TG-DSC.

Os corpos de prova de compósito epóxi-vidro exibiram comportamento típico de polímeros frágeis, pois não apresentaram fase plástica nem ponto de escoamento. Este comportamento é ditado pela presença das fibras de vidro que são materiais cerâmicos (frágeis) cuja curva tensão-deformação é tipicamente linear (elástica), possuindo baixo alongamento e elevado limite de ruptura. Por este motivo, o módulo de elasticidade para o compósito foi muito maior que o atingido pelo PC.

A anisotropia do compósito foi verificada em todas as propriedades mecânicas determinadas nesse ensaio. Os valores de tensão σ_u e σ_r foram maiores para cargas aplicadas na mesma direção de orientação das fibras, isto é, para o compósito com fibras longitudinais ao comprimento do corpo de prova, chegando a ser mais de dez vezes superior aos do compósito com fibras transversais, como era de se esperar. De modo semelhante, o módulo de tenacidade U_t foi quase dez vezes maior para o compósito de fibras longitudinais.

O módulo de elasticidade E , representativo da quantidade de energia absorvida pelo material na fase elástica, foi maior para o material compósito, particularmente o de fibras

longitudinais. Verifica-se que o compósito de fibras transversais se rompe com alongamento médio de 1,7%, com limite de ruptura médio de 50MPa, cerca de onze vezes inferior ao do compósito de fibras longitudinais. Isto sugere que a direção das fibras esteja governando o comportamento do compósito e que na direção transversal, as mesmas não promovem melhoria significativa nas propriedades mecânicas do compósito. De fato, esse valor de σ_r está mais próximo ao valor teórico do epóxi (10 MPa) do que ao das fibras (acima de 1000 MPa) (SP COMPOSITES, 2007).

O desvio-padrão experimental foi atribuído às características da amostra (variações dimensionais em torno de 7% oriundas da preparação dos corpos de prova na fresa de topo, podendo ter originado regiões de concentração de tensões). Para o compósito, o desvio-padrão das amostras ensaiadas foi elevado, atribuído ao material (possível existência de fibras desalinhadas em relação à direção de aplicação da carga, distribuição não homogênea das fibras e variação da razão matriz/ reforço no volume, originados durante a manufatura da placa laminada), sendo importante a inspeção do material compósito por radiografia computadorizada (seção 4.5).

4.3.2 Ensaio de impacto Charpy

A Figura 31 apresenta fotografias dos corpos de prova após a realização do ensaio de impacto; os valores experimentais da energia de impacto estão mostrados na Tabela 6.

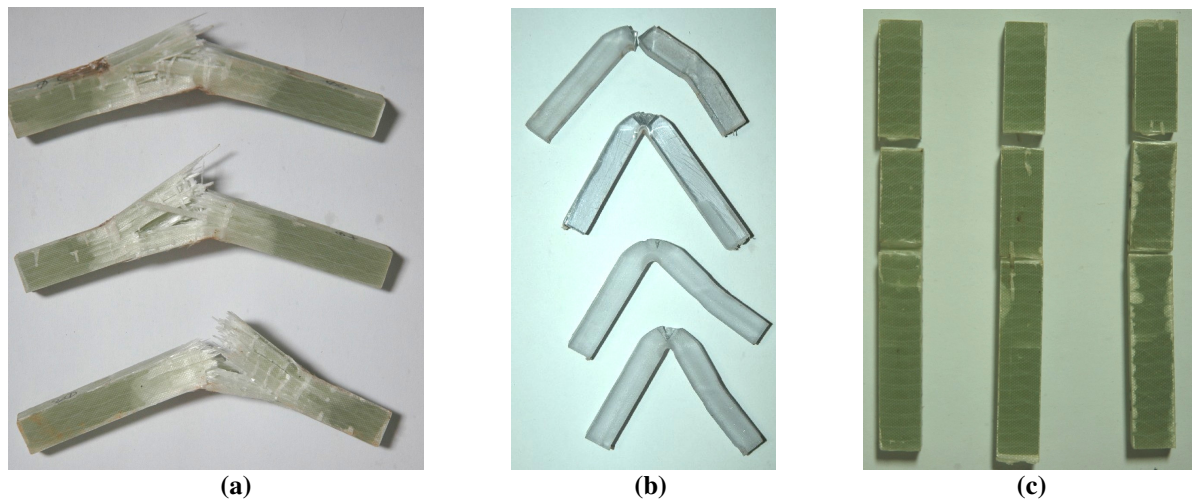


Figura 31. Corpos de prova após o ensaio de impacto com pêndulo. (a) Compósito epóxi-vidro com fibras longitudinais. (b) PC íntegro. (c) Compósito epóxi-vidro com fibras transversais.

Tabela 6. Valores experimentais do ensaio de impacto.

Material	Energia de impacto (J)
PC íntegro	$59,5 \pm 8,8$
Compósito epóxi vidro (fibras longitudinais)	$113,4 \pm 4,8$
Compósito epóxi vidro (fibras transversais)	$4,9 \pm 1,3$

Como era esperado, os corpos de prova de compósito epóxi com as fibras de vidro dispostas longitudinalmente ao comprimento apresentaram energia de impacto superior aqueles com as fibras transversais em que as fibras, estando na mesma direção do movimento do martelo pendular, oferecem menor resistência ao golpe. A energia de impacto do PC apresentou valor médio intermediário aos dois tipos de amostras de compósito.

Por esse ensaio fica evidente que o reforço de fibras na matriz epóxi melhora as propriedades mecânicas do compósito e por conta disso optou-se por usar no ensaio balístico um compósito com fibras de vidro do tipo biaxial ($0/90^\circ$), na expectativa de se maximizar o desempenho balístico do compósito em relação ao PC.

4.3.3 Ensaio de microdureza

As identações nas amostras de compósito foram feitas em regiões com predominância da fase contínua (matriz), pois o polimento das amostras com SiC e pó de alumina foi insuficiente para eliminar os efeitos da rugosidade superficial e não permitiu visualizar as identações; a literatura sugere polimento eletrolítico (GARCIA et al., 2000). O efeito da orientação das fibras sobre a microdureza do compósito não foi estudado.

A Figura 32 apresenta resultados de microdureza para as amostras de compósito epóxi-vidro e PC, em que é possível observar a dependência da microdureza em relação à carga aplicada.

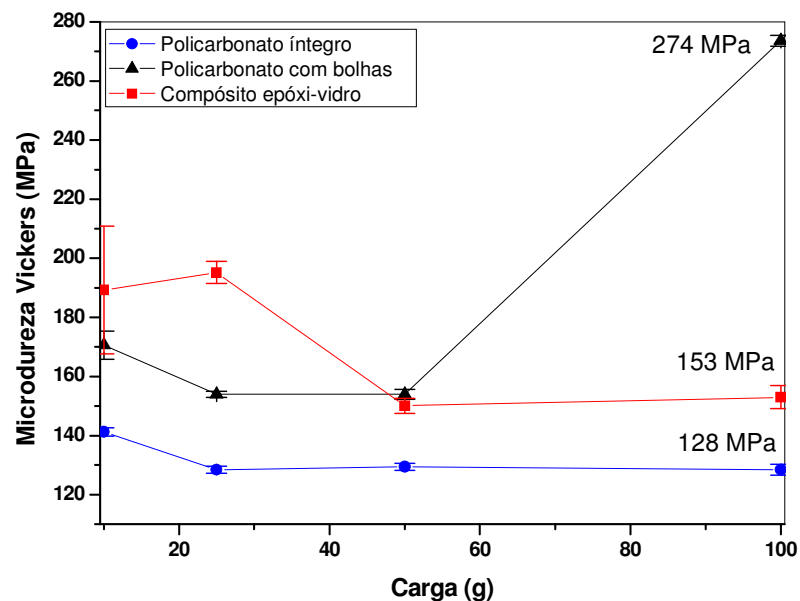


Figura 32. Resultados do ensaio de microdureza para compósito epóxi-vidro e PC.

De acordo com a literatura, a variação da microdureza em função da carga é atribuída à natureza viscoelástica dos polímeros, isto é, o seu comportamento é dependente do tempo. As amostras de PC íntegro e compósito epóxi vidro apresentaram saturação com o

aumento da carga e este patamar atingido representa a microdureza do material (SINGH et al., 2007).

A microdureza do PC com bolhas foi superior à do PC íntegro e do compósito, mostrando que o tratamento térmico tornou o material mais duro, mais um indicativo de que o polímero foi fragilizado pela temperatura. O PC com bolhas não atingiu um patamar de microdureza na faixa de carga aplicada, mesmo utilizando cargas maiores (até 2 kg); o valor da microdureza na carga de 100g (274 MPa) foi atribuído à alteração da microestrutura do PC após aquecimento a 180°C, causando a liberação e migração de uma determinada substância formadora das bolhas (provavelmente o bisfenol-A como discutido na seção 4.6.6) e redução da viscosidade do material.

A Figura 33 mostra imagens de microscopia óptica das identações do ensaio de microdureza na superfície das amostras de compósito epóxi-vidro e PC, respectivamente.

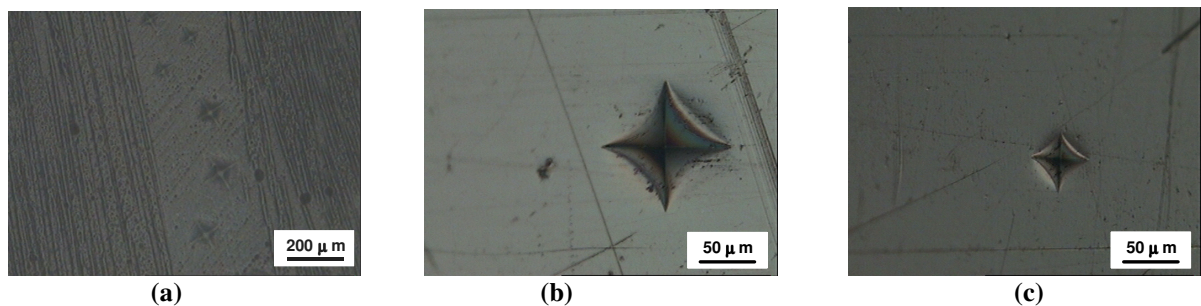


Figura 33. Identações de microdureza Vickers observadas por microscopia óptica. (a) compósito. (b) PC íntegro. (c) PC com bolhas.

Idealmente, uma indentação perfeita tem o formato quadrado (Figura 13); entretanto, as identações no PC e no compósito epóxi-vidro não foram perfeitamente quadradas, exibindo um achatamento nas faces laterais, influenciando a mensuração do comprimento das diagonais indentadas e a elevação dos valores de desvio-padrão, especialmente para o material compósito.

4.3.4 Ensaio de impacto com pêndulo em prensa hidráulica

O ensaio de impacto na prensa hidráulica foi fundamental para se estudar a quebra de isoladores de vidro com e sem proteção balística, uma vez que ensaios normatizados com corpos de prova padronizados oferecem informações relacionadas mais ao material do que ao desempenho do produto propriamente dito.

Usando o pêndulo com ponta de 10 mm de diâmetro e altura de queda de 1m, conseguiu-se quebrar um isolador de vidro que não possuía proteção balística. A energia de impacto pôde ser calculada com esses dados através da Equação 6, admitindo como hipótese um sistema conservativo de energia, sendo m a massa do pêndulo (21 kg), g a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) e h a altura de queda do pêndulo. Os valores de energia de impacto estão mostrados na Tabela 7. Vale ressaltar que esses valores correspondem à energia de impacto suficiente para quebrar um isolador de vidro, porém existe a possibilidade do mesmo ser quebrado com menor energia de impacto (menor altura de queda e/ou massa do pêndulo).

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (6)$$

Tabela 7. Valores de energia de impacto suficiente para quebrar o isolador de vidro no ensaio de impacto na prensa hidráulica.

Diâmetro da ponta do pêndulo	Tipo de proteção balística	Altura de queda do pêndulo (m)	Energia de impacto* (J)
10 mm	Nenhum	1,00	206
10 mm	PC alveolar** 4 mm	1,50	309
10 mm	PC compacto 3 mm	1,80	370
10 mm	PC compacto 6 mm	2,50	514
5 mm	Nenhum	0,75	154
5 mm	PC alveolar** 4 mm	1,00	206
5 mm	PC compacto 3 mm	1,20	245
5 mm	PC compacto 6 mm	2,00	412

* Energia suficiente para quebrar o isolador de vidro, não necessariamente a mínima.

** PC alveolar: material íntegro; chapa lisa com cavidades internas (alvéolos).

Dentre todas as configurações testadas, o pior resultado ficou com o isolador sem proteção balística, em que as energias de impacto de 206 J (ponta do pêndulo de 10mm) e 154 J (ponta de 5mm) foram suficientes para quebrar o isolador de vidro. Após a colocação de um protetor de PC compacto com 3mm de espessura, a energia de impacto aumentou e o melhor resultado ficou para o PC compacto de 6 mm de espessura. O pior desempenho ficou para o PC tipo alveolar.

Supondo que a massa de um projétil de revolver 38 seja 10 g e que sua velocidade imediatamente após o disparo seja em torno de 250 m/s, então o valor de energia cinética do projétil no impacto é cerca de 315 J, desprezando as perdas de energia no percurso da bala até atingir o alvo. Como essa energia é superior à necessária para quebrar o isolador de vidro sem escudos, acredita-se que um disparo efetuado com esse tipo de munição conseguirá quebrar no ensaio balístico um isolador sem escudo; contudo conseguirá mantê-lo íntegro quando protegido com escudo de PC compacto de 6 mm. Por conta disso, nos testes balísticos não foram testados escudos de PC tipo alveolar 4 mm nem compacto de 3mm.

4.4 Ensaio balístico

A Figura 34 mostra os arranjos experimentais do ensaio balístico; os resultados estão apresentados na Tabela 8 e Figuras 35 a 38.

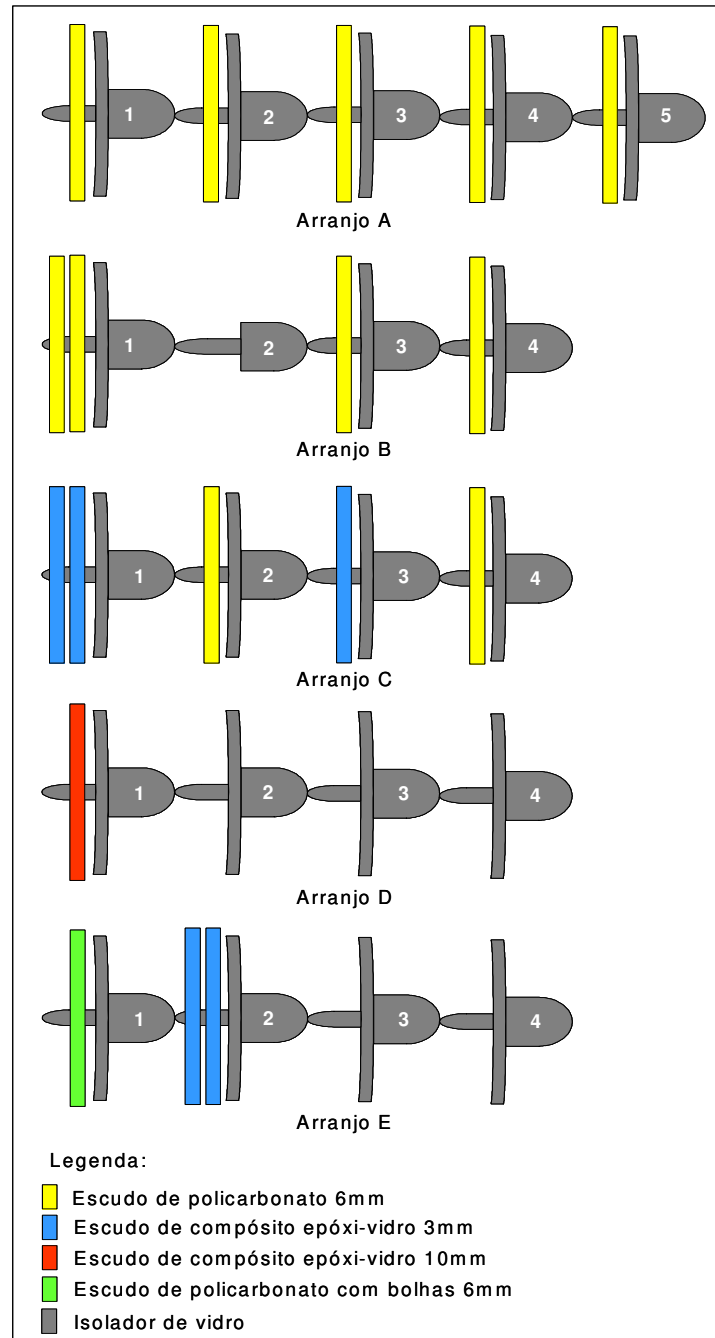


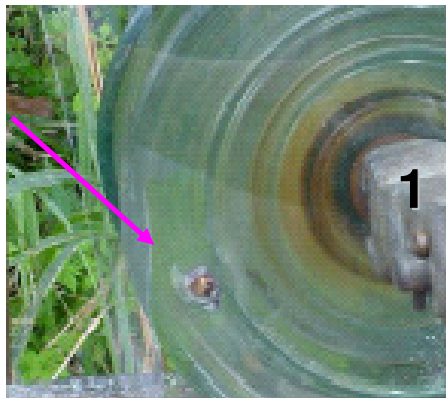
Figura 34. Arranjos experimentados nos ensaios balísticos.

Tabela 8. Danificação máxima observada nas cadeias de isoladores de vidro após ensaio balístico.

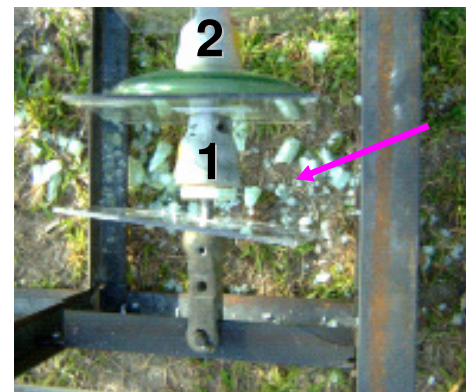
Arranjo	Arma	Integridade da cadeia após os disparos									
		Isolador 1		Isolador 2		Isolador 3		Isolador 4		Isolador 5	
		E	V	E	V	E	V	E	V	E	V
A	Revolver 38	P	I	I	I	I	I	I	I	I	I
A	Pistola Glock 38	P	Q	I	I	I	I	I	I	I	I
A	Pistola Glock 45	P	Q	P	Q	P	I	I	I	I	I
A	Revolver Magnum 44	P	Q	P	Q	P	Q	I	I	I	I
B	Pistola Glock 38	P	I	NA	NA	I	I	I	I	NA	NA
B	Carabina Puma 38	P	Q	NA	NA	I	I	I	I	NA	NA
C	Pistola Glock 38	P	I	I	I	I	I	I	I	NA	NA
C	Carabina Puma 38	P	Q	I	I	I	I	I	I	NA	NA
D	Revolver 38	I	I	NA	I	NA	I	NA	I	NA	NA
D	Carabina Puma 38	P	I	NA	I	NA	I	NA	I	NA	NA
D	Carabina Puma 38*	P	I	NA	I	NA	I	NA	I	NA	NA
D	Carabina Puma 38**	P	I	NA	I	NA	I	NA	I	NA	NA
E	Revolver 38	P	Q	P	I	NA	I	NA	I	NA	NA
E	Pistola Glock 38	P	Q	P	I	NA	I	NA	I	NA	NA

E: escudo. V: disco de vidro. P: perfurado. Q: quebrado. I: íntegro. NA: não se aplica.

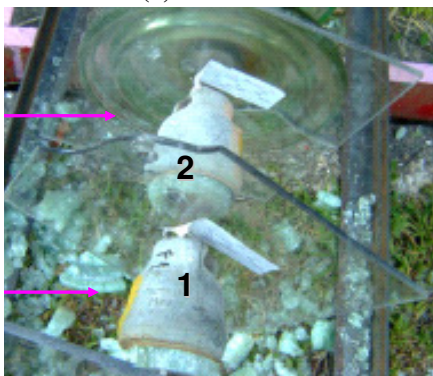
(*) Munição com carga +P. (**) Munição com ponta ogival.



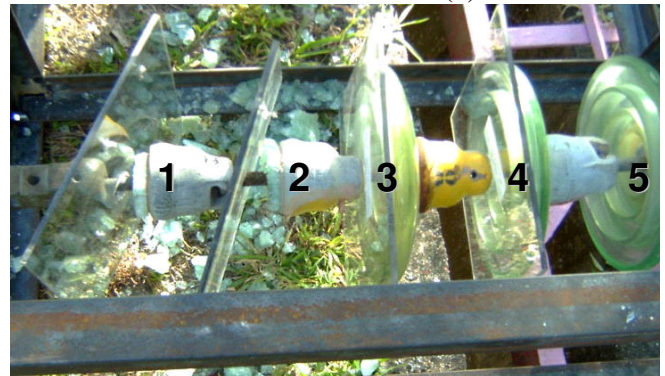
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 35. Resultados do ensaio balístico no arranjo A. (a) Projétil alojado no escudo de PC após disparo com revólver 38, manutenção da integridade do disco vidro. (b) Quebra do 1º isolador de vidro com pistola Glock 38. (c) Quebra do 2º isolador de vidro com revólver Magnum 44. (d) Cadeia com 1º e 2º isoladores de vidro quebrados.



(a)

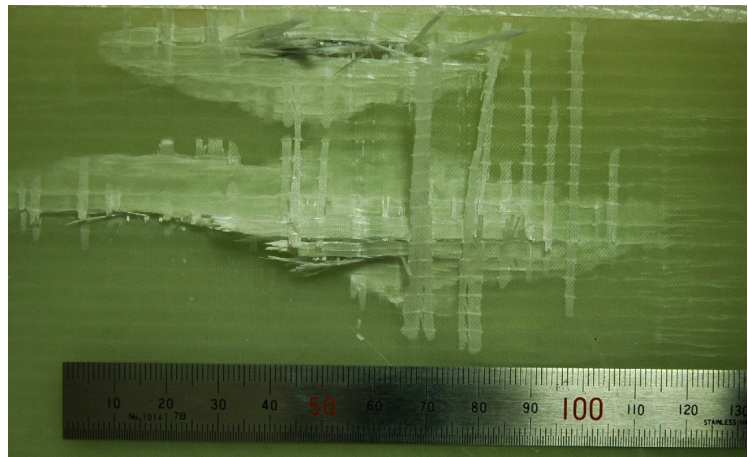


(b)

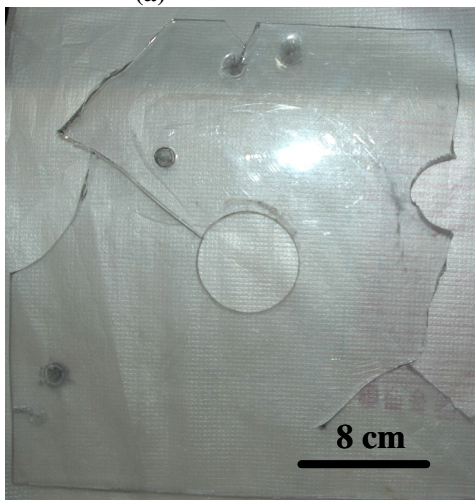
Figura 36. Resultados do ensaio balístico nos arranjos C e E. (a) Arranjo C após disparos com Glock 38. (b) Detalhe da perfuração do escudo de PC com bolhas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 37. Danos nos escudos após ensaio balístico. (a) Escudo de compósito 10mm após disparos com revólver 38. (b) Escudo de compósito 3mm após disparos com pistola Glock 38. (c) Escudo de PC após diversos disparos. (d) Escudo de compósito 10mm após disparos com pistola Glock 38.

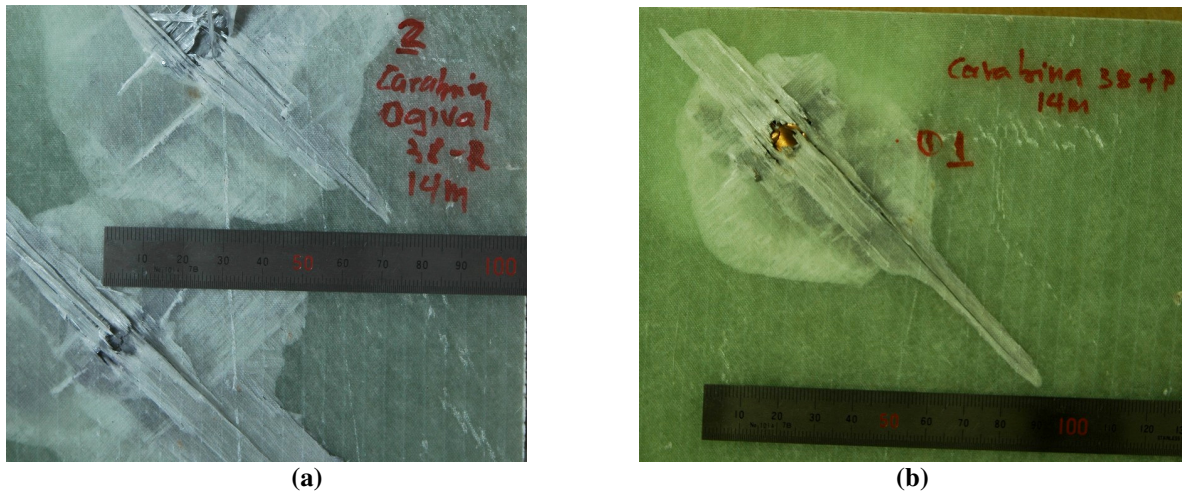


Figura 38. Danos em escudo compósito 10mm após ensaio balístico. (a) Após disparos com carabina Puma 38 ponta ogival. (b) Após disparos com carabina Puma 38 carga +P.

O pior desempenho foi o do PC com bolhas que não impediu os projéteis de quebrar o isolador nº 1 da cadeia no arranjo E. Utilizando o revólver calibre 38 no arranjo A, o PC 6mm conseguiu manter a integridade de todos os isoladores da cadeia e apenas o escudo nº1 foi perfurado. Com escudo de compósito 10 mm (arranjo D) o isolador nº1 se manteve íntegro, e o escudo não chegou a ser perfurado.

A pistola Glock 38 quebrou no máximo o isolador nº 1 protegido com PC de 6mm (arranjo A). Não foi possível quebrar o isolador nº1 usando dois escudos de PC 6mm (arranjo B), nem mesmo com 2 escudos de compósito 3mm (arranjo C).

A pistola Glock 45 foi testada apenas no arranjo A; o projétil conseguiu perfurar os escudos nº 1 e 2 e quebrar o isolador nº 2. Disparos posteriores conseguiram perfurar os escudos nº 1 ao 3 mas não quebraram o isolador nº 3.

O revolver Magnum 44 foi testado apenas no arranjo A. Os disparos conseguiram perfurar os escudos nº 1, 2 e 3 e quebraram o isolador nº 3, já que o 1º e o 2º isoladores já haviam sido quebrados pela Glock 38 e Glock 45. Disparos posteriores não conseguiram quebrar mais nenhum isolador da cadeia, ou seja, o limite máximo de quebra obtido foi de 3 isoladores de vidro com essa arma.

A carabina Puma 38 usada no arranjo B conseguiu perfurar os dois escudos de PC 6mm e quebrar o isolador nº 1; no arranjo D, os projéteis ficaram alojados no escudo de compósito 10 mm, o qual manteve a integridade de todos os isoladores da cadeia.

É importante salientar que os escudos de compósito 10mm não apresentaram perfuração total, isto é, o projétil não atravessou por completo a espessura do material, sendo na realidade uma perfuração parcial. A perfuração total ocorreu nos escudos de compósito 3mm e PC 6mm.

No material compósito, após a perfuração as cargas dos projéteis se espalharam no interior dos escudos, como indicadas nas Figuras 37 e 38 pela coloração cinza; isso ocorreu em função da natureza do projétil que é projetado para se espalhar após o impacto no objeto alvejado. Observa-se fratura das fibras de vidro nas regiões perfuradas e delaminação das camadas do escudo (coloração branca ao redor da região perfurada). O mesmo tipo de delaminação foi observado nos corpos de prova de fibras longitudinais do ensaio de impacto Charpy, podendo ser atribuído ao projeto de fabricação das placas de compósito que, neste caso, são feitas de várias camadas de tecido de vidro. Diferentemente do ocorrido nos escudos de PC, os de compósito não se quebraram. Esses resultados demonstraram o excelente desempenho balístico do material compósito epóxi-vidro de 3 mm e 10 mm, substancialmente superior ao PC 6mm; no entanto, acredita-se que a espessura de 10 mm esteja superdimensionada para a aplicação desejada, visto que os projéteis do revólver 38 não conseguiram atravessar o material.

De forma geral, os resultados do ensaio balístico foram considerados excelentes, visto que no máximo foram quebrados três isoladores de vidro em vários disparos com revólver Magnum 44, uma arma de uso restrito e de maior poder de fogo entre as que foram testadas neste trabalho. Em se tratando do revólver 38 (líder de vendas no Brasil), a integridade da cadeia foi totalmente preservada; na hipótese dessa arma ser a mais utilizada

nos atos de vandalismo, espera-se que apenas um escudo (PC 6mm, compósito 3 mm ou 10 mm) consiga manter íntegros todos os isoladores de vidro de uma cadeia para linhas de 230 kV. Ressalta-se ainda que os disparos foram efetuados a uma distância de 14 m na direção horizontal, e que na condição de real, a altura mínima de uma cadeia é superior a 15 m.

Apesar do superior desempenho balístico, acredita-se em uma desvantagem do escudo de compósito em relação ao PC: a delaminação provocada pelos projéteis pode deixar o volume (*bulk*) do material exposto à penetração de umidade, sujeira, radiação solar etc., acelerando o processo de degradação ao longo do seu tempo de vida útil. Quando um projétil perfura o PC, o aumento de temperatura devido ao impacto causa uma espécie de cauterização ao redor do orifício criado pela bala. Por outro lado, dependendo da região alvejada, o PC pode ser quebrado em pedaços pelos tiros (Figura 37.c), o que não ocorre com o compósito (devido à presença das fibras) nem com o PC com bolhas (devido à natureza frágil).

Se comparados os resultados balísticos com os ensaios mecânicos laboratoriais, observa-se que nos ensaios de impacto Charpy o compósito de fibras longitudinais teve tenacidade ao impacto superior ao PC. Isto permite inferir que houve uma boa coerência entre os experimentos, sendo notória a melhoria das propriedades mecânicas do compósito em função da adição das fibras e sua orientação no laminado.

Igualmente, os resultados do ensaio de impacto com isoladores de vidro em prensa hidráulica haviam estimado que no teste balístico um projétil de revólver 38 conseguiria quebrar um isolador de vidro sem proteção e que um escudo de PC de 6 mm seria suficiente para impedir a quebra do isolador pelo impacto dessa munição, o que de fato ocorreu.

4.5 Ensaio de radiografia computadorizada

A Figura 39 mostra resultados de da inspeção por radiografia computadorizada na amostra de compósito epóxi-vidro.

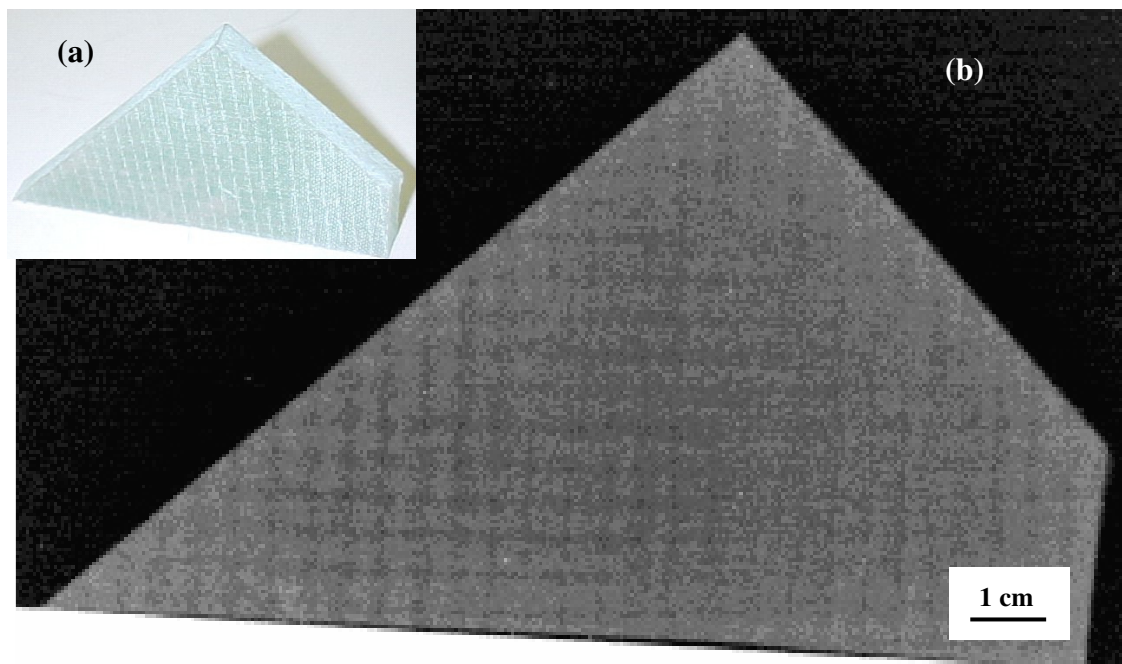


Figura 39. Resultados da inspeção radiográfica do compósito epóxi-vidro. (a) Fotografia da amostra. (b) Imagem de radiografia computadorizada da amostra.

A imagem radiográfica revela a textura das linhas de costura do tecido de vidro biaxial, que é feita de material poliéster. Esta linha de costura mantém alinhados os filamentos de vidro do tecido. Observa-se que esta amostra radiografada possui as camadas de fibras de reforço dispostas alternadamente em $0^\circ/90^\circ$. Além disso, na imagem radiográfica não foram evidenciados defeitos como bolhas, vazios ou desalinhamento pronunciado das fibras.

As imagens de microscopia óptica (Figura 40) também conseguiram revelar a linha de costura de poliéster de coloração branca existente no material compósito, que é visível ao olho humano somente na superfície do laminado ou no tecido de vidro seco. Os filamentos de vidro e a resina epóxi preenchendo o laminado também foram identificados; o

diâmetro da fibra foi medido apresentando cerca de 20 μm . Não foi revelada a existência de bolhas no material.

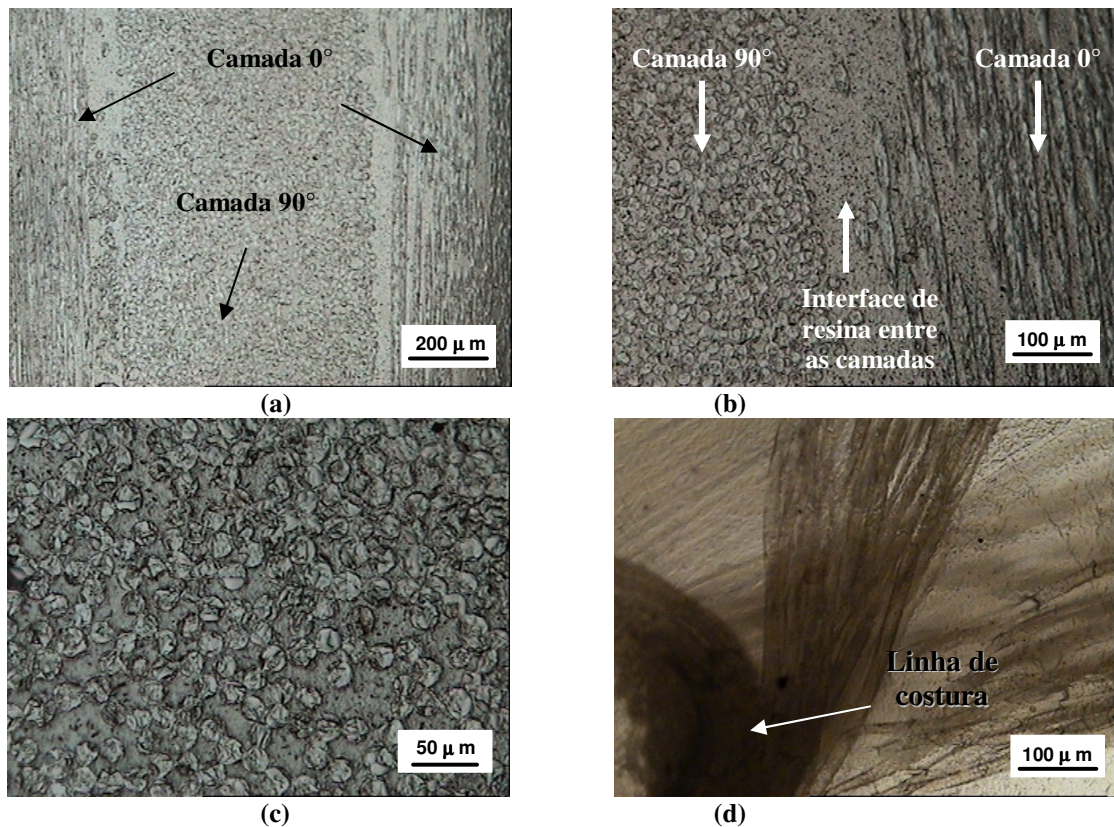


Figura 40. Imagens de microscopia óptica das amostras de compósito epóxi-vidro. (a) Camadas alternadas de fibras de reforço no laminado. (b) Magnificação do item (a). (c) Fibras de vidro da camada 90°. (d) Linha de costura, formada por fios de poliéster.

4.6 Caracterização dos materiais do escudo balístico

4.6.1 Medidas de densidade

As amostras do compósito epóxi-vidro apresentaram densidade de $1,97 \pm 0,02$ g/cm^3 , em concordância aos dados da literatura (CALLISTER JR., 2003). O PC apresentou

$1,20 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, também de acordo com dados do fabricante (Tabela 3). A formação de bolhas no PC aquecido alterou sua densidade para $1,02 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$, o que corresponde a uma redução de 15% do seu valor original.

4.6.2 Análise química por fluorescência de raios-X

A Tabela 9 apresenta a composição química semi-quantitativa por FRX das amostras de compósito epóxi-vidro determinada pelo método de Parâmetros Fundamentais. Os resultados mostram a presença majoritária do elemento carbono oriundo da resina polimérica epóxi, além dos elementos químicos comumente encontrados em fibras de vidro do tipo *E-glass*, uma fibra apropriada para aplicações elétricas, feita a partir de vidro alumino-boro-silicato de cálcio, cuja composição típica é: 52–62% SiO_2 , 16–25% CaO , 12–16% Al_2O_3 , 0–10 % B_2O_3 , 0–5 % MgO , 0–2% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, 0–1,5% TiO_2 e 0,05–0,8% Fe_2O_3 (CALLISTER JR., 2003).

Tabela 9. Análise química semi-quantitativa do compósito epóxi-vidro, determinada por FRX.

Elemento	% massa	Elemento	% massa
C	52,84	Na	0,26
O	32,30	Cl	0,23
Si	5,84	Ti	0,10
Ca	5,73	Fe	0,07
Al	1,86	K	0,03
Mg	0,70	Sr	0,02
		Outros	0,02

A análise química do PC íntegro está mostrada na Tabela 10. Foram identificados os elementos majoritários carbono e oxigênio da estrutura do mero (Figura 8), resultante da reação entre o bisfenol-A e o ácido carbônico. A presença de bromo e fósforo é atribuída aos

aditivos retardantes de chama do tipo orgânico não-reativos (isto é, não incorporados à cadeia do polímero), segundo Paoli (2007). Traços de enxofre também foram encontrados nas amostras de PC, e isto se justifica pelo uso desse elemento como retardante de chama, segundo patente americana da Bayer (FREITAG; NOUVERTNE, 1978) e também atribuídos a aditivos estabilizantes (tioésteres).

Tabela 10. Análise semi-quantitativa do PC íntegro, determinada por FRX.

Elemento	% massa
C	79,406
O	20,577
Br	0,010
P	0,004
S	0,002

4.6.3 Difração de raios-X

Pelos resultados de difração de raios-X para o PC e o compósito epóxi-vidro (Figura 41), é possível identificar a presença de um grande halo próximo ao ângulo de difração de 17 graus, sendo este halo típico para materiais de estrutura amorfa. Não foram identificadas diferenças quanto à estrutura do material com bolhas em função do aquecimento a 180°C, no que diz respeito à presença de regiões cristalinas, visto que todas as curvas ficaram praticamente sobrepostas.

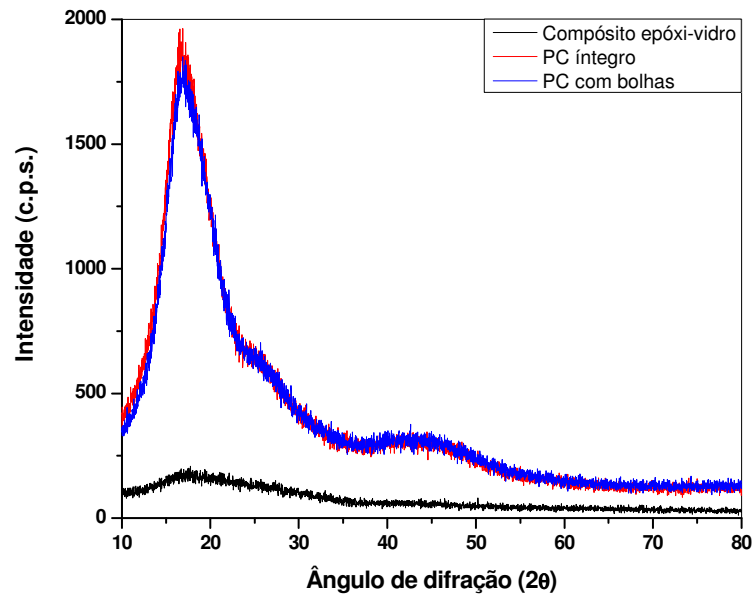


Figura 41. Medidas de difração de raios-X em compósito epóxi-vidro e PC.

4.6.4 Espectroscopia de ultravioleta-visível e infravermelho

A Figura 42 apresenta o espectro de transmitância no UV-Vis para o PC e compósito. Verifica-se que abaixo de 400 nm a transmitância óptica é praticamente nula para o PC, o que significa dizer que o material absorveu completamente a radiação na região UV, como esperado uma vez que as chapas adquiridas continham aditivos UV. Esse valor chamado de *cut-off* foi de 350 nm para o compósito epóxi-vidro. A presença das bolhas no PC devido ao aquecimento a 180° diminuiu a transmitância do feixe, mas em toda a faixa UV também houve completa absorção UV, o que permite dizer que o aquecimento não alterou a aditivção do material. O compósito epóxi-vidro apresentou a menor transmitância na região visível porque as amostras eram translúcidas, ao passo que o PC íntegro é transparente.

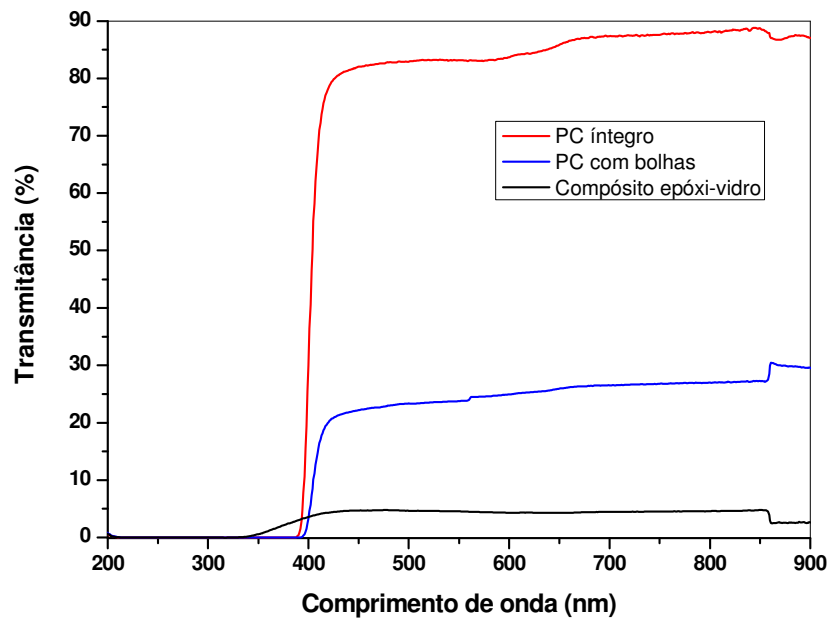


Figura 42. Espectro de transmitância no UV-Vis para o PC e compósito epóxi-vidro.

As Figuras 43 e 44 mostram os espectros de infravermelho do PC e do compósito epóxi-vidro.

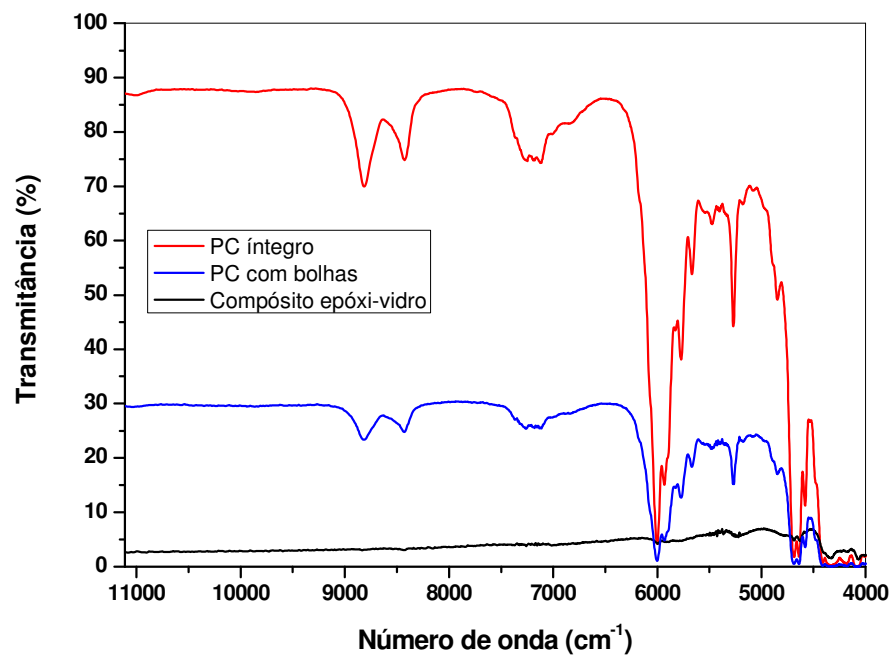


Figura 43. Espectros de infravermelho na região 11100 – 4000 cm^{-1} .

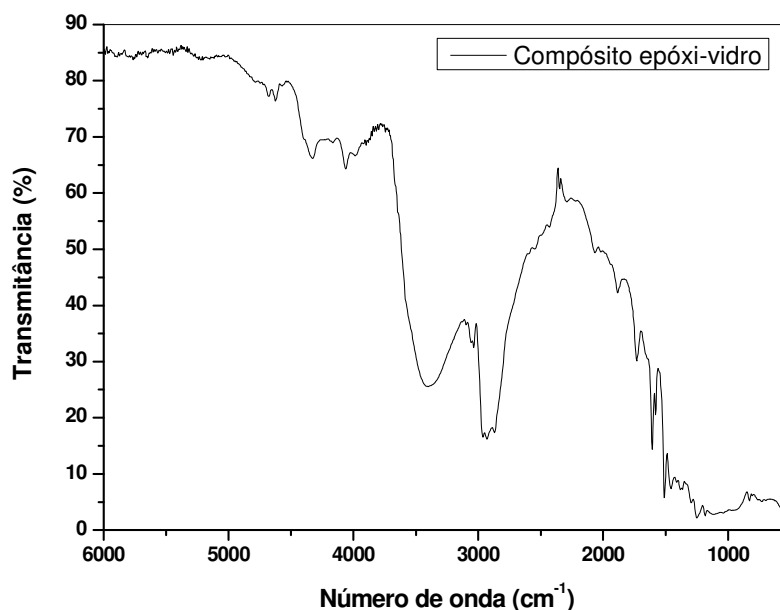


Figura 44. Espectro de infravermelho na região 6000 – 900 cm^{-1} .

As bandas de vibração dos principais grupos funcionais do PC estão na Tabela 11, em concordância com os resultados obtidos por Araújo e Kawano (2001), Jang e Wilkie (2005) e Diepens e Gijsman (2007). Em termos de comprimento de onda, não se observa diferença entre o PC íntegro e com bolhas.

Tabela 11. Bandas de absorção identificadas no espectro de infravermelho para as amostras de PC íntegro.

Número de onda (cm^{-1})	Grupo funcional
4073, 3676, 3058	O–H
5998, 5922, 3041, 2890, 2873, 1602, 1510, 1465, 1386	C–H
2970	C–H ₃
5760, 2935	C–H ₂
5261, 3531, 1789, 1654	C=O

As principais bandas de absorção dos grupos funcionais do compósito estão indicadas na Tabela 12 e foram atribuídas à resina epóxi, baseando-se nos trabalhos de Kortaberria et al. (2004) e Escola et al. (2005). Tais bandas evidenciam que o sistema de resina epóxi utilizado na fabricação das amostras possui monômero DGEBA (*diglycidyl ether of bisphenol A*) com agente de cura DDM (*diaminodiphenyl methane*), cujas estruturas estão ilustradas na Figura 45.

Tabela 12. Bandas de absorção de grupos funcionais identificados no espectro de infravermelho das amostras de compósito epóxi-vidro.

Número de onda (cm^{-1})	Grupo funcional
4678, 4624, 3097, 1608, 1581, 1512, 829	C-H do anel aromático
4528	C-H do anel oxirano
3055, 3035, 2931, 1359	C-H do metil ($-\text{CH}_3$)
2962, 2869, 1458	C-H do metileno ($-\text{CH}_2$)
1184	C-N
1296, 1253	C-O
4530, 3400, 1741, 1643	N-H

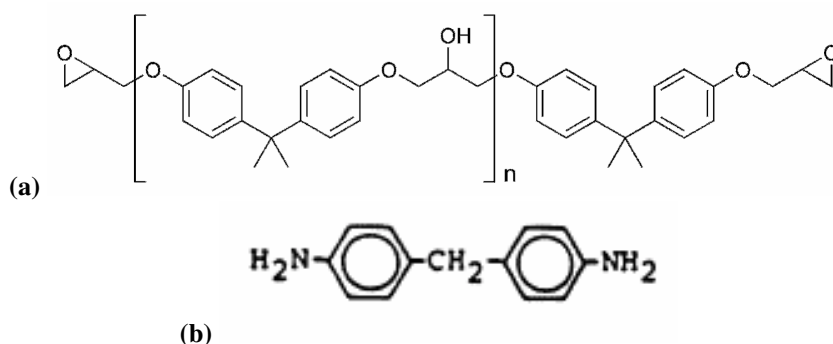


Figure 45. Estrutura da resina epóxi DGEBA (a), e do agente de cura DDM (b).

4.6.5 Análise térmica

A Figura 46 mostra que o compósito epóxi-vidro apresentou perda de 21% em massa até 450°C, apresentando temperatura de início de decomposição em torno de 320°C, em atmosfera de nitrogênio. Esta perda foi atribuída à volatilização e/ ou decomposição da parte polimérica (resina epóxi), pois as fibras de vidro são estáveis nesta faixa de temperatura, sendo que o processo de fabricação utilizado (infusão vácuo) normalmente utiliza cerca de 25% em massa de resina em relação à massa total do laminado.

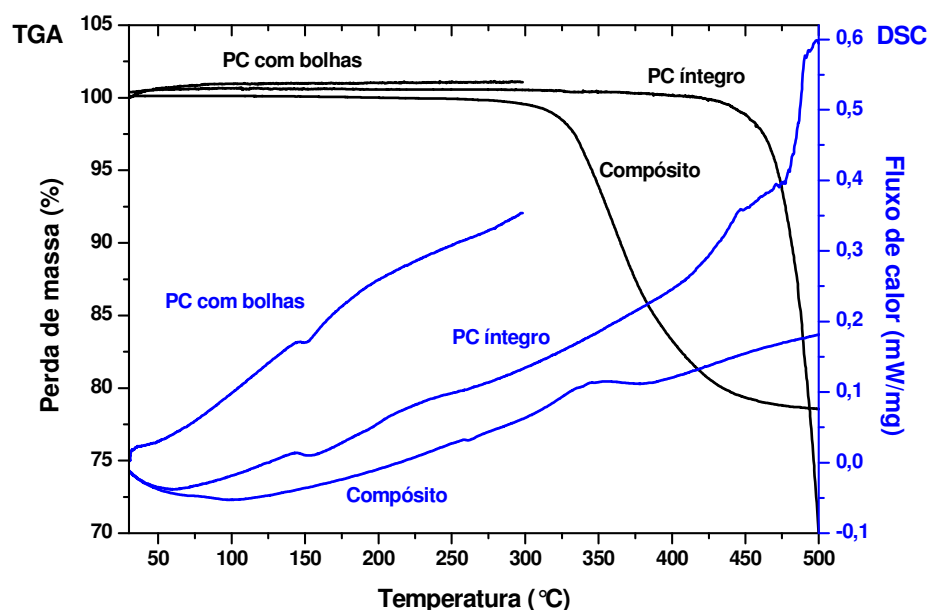


Figura 46. Resultados de TGA-DSC para o PC e o compósito epóxi-vidro.

Para o PC íntegro, a temperatura inicial de decomposição foi superior a 400°C em atmosfera de nitrogênio, chegando a perder 30% de massa até a temperatura final estudada (500°C). Kaisersberger e colaboradores (1994) reportaram que por volta de 480°C o PC perde 10 a 20% em massa quando aquecido a 10°C/min a partir da temperatura ambiente. É bastante provável que acima de 500°C a decomposição do material continue ocorrendo na mesma taxa. O PC com bolhas não apresentou perda de massa no intervalo monitorado (30–300°C).

Segundo Saron e Felisberti (2002), quando o PC é submetido à decomposição térmica, ocorre um rearranjo do grupo carbonato, originando um grupo éter na cadeia principal e um grupo carboxílico na posição orto do anel aromático do bisfenol-A. Reações subsequentes, envolvendo o éter levam à reticulação com perda de CO₂. Esta etapa de decomposição deve corresponder à primeira deflexão na curva de TGA que ocorre entre 400 e 550°C e resulta em um material reticulado com cerca de 40% da massa original do polímero. A segunda deflexão observada nas curvas de TGA deve ser resultante de reações oxidativas do material reticulado formado, gerando compostos voláteis (Figura 47).

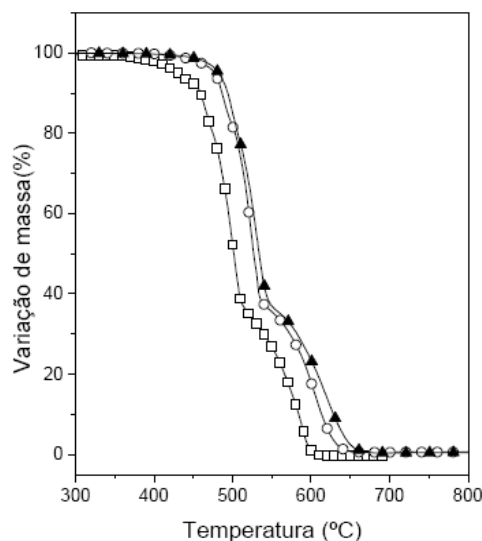


Figura 47. Curvas termogravimétricas encontradas por Saron e Felisberti (2002). (□) 5 °/minuto; (o) 10°/minuto; (▲)15 °/minuto.

Observa-se nas curvas de DSC de todas as amostras a existência de picos exotérmicos nas mesmas temperaturas do início de perda de massa, relacionados a pirólise da amostra que libera calor.

Pelas curvas de DSC, observa-se um aumento no fluxo de calor em função do aumento da temperatura, atingindo um pico correspondente à passagem da temperatura de vitrificação, a partir da qual o polímero torna-se mole, aceitando uma transferência de calor maior. A T_g do PC íntegro foi observada em torno de 145°C e nenhuma mudança significativa foi verificada com relação à T_g do material com bolhas. Para o compósito, a T_g ficou em torno de 83°C. Esses valores estão dentro da faixa teórica esperada (KAISERSBERGER et al., 1994). A transição vítrea marca a transição do estado vítreo para o viscoso em polímeros amorfos, onde as moléculas ganham maior mobilidade. Ultrapassada a T_g , a curva prossegue com taxa constante (10°C/min), porém num patamar maior. Para o PC íntegro, um suave, largo pico exotérmico caracterizou o início da fusão em torno de 225°C, e de maneira semelhante se comportou o PC com bolhas. O compósito apresentou T_m em torno de 260°C. Foi observada correlação linear positiva ($r = 0,96$) entre a T_g transição vítrea e a rigidez dielétrica das amostras (Figura 48).

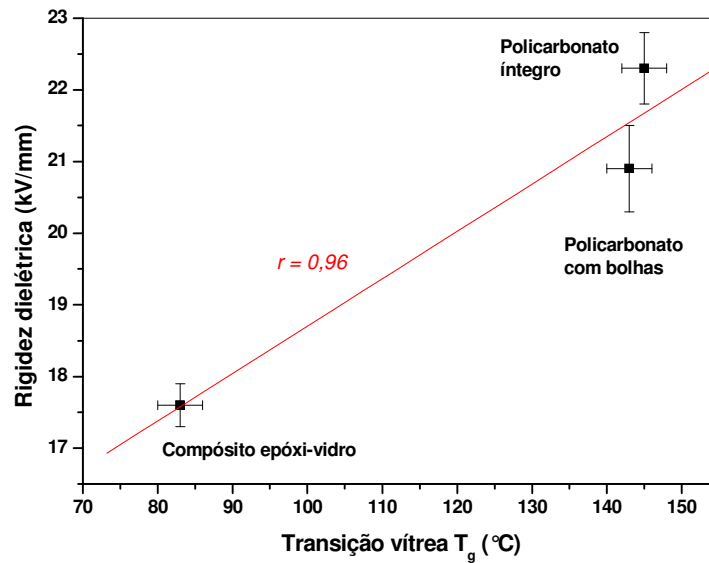


Figura 48. Correlação entre as medidas experimentais de T_g e rigidez dielétrica.

4.6.6 Considerações sobre a formação de bolhas no PC aquecido a 180°C

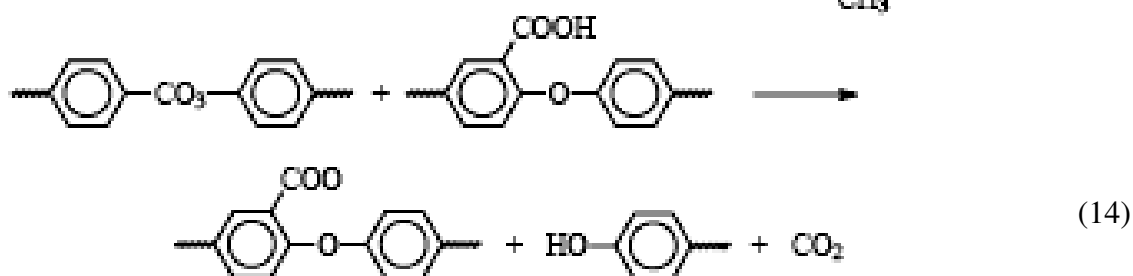
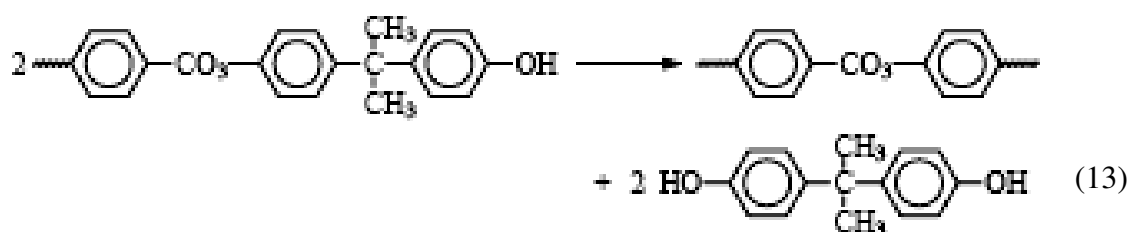
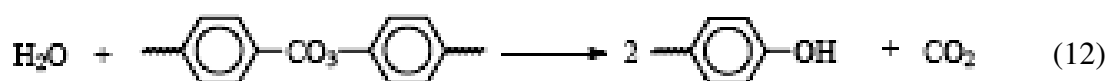
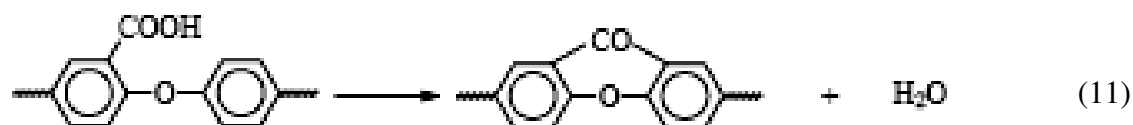
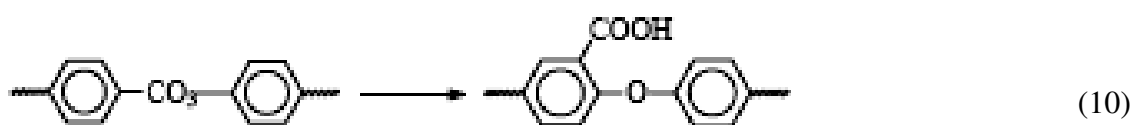
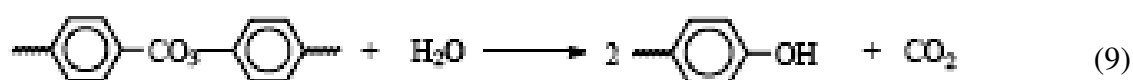
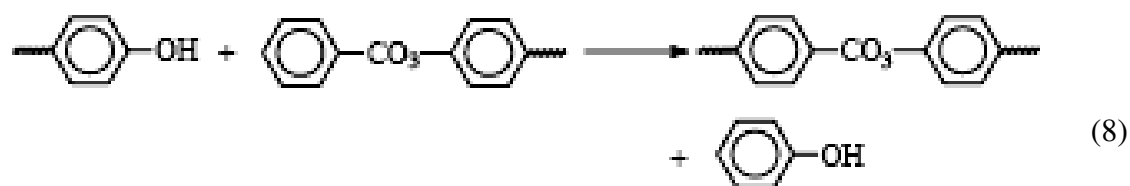
Como foi observado, o aquecimento do PC até 180°C ocasionou a formação de bolhas no material e as investigações realizadas neste trabalho mostraram que sua densidade foi diminuída e a microdureza aumentada, mantendo a T_g próxima de um material íntegro; contudo, foram prejudicadas a tenacidade, a resistência à tração e ao impacto, deixando o PC mais leve e frágil de forma que seu desempenho balístico foi considerado bastante ruim. Até mesmo sua rigidez dielétrica foi reduzida em comparação ao material íntegro. Com relação a sua microestrutura, o PC com bolhas manteve estrutura amorfa. Nesse sentido, pode-se dizer que o tratamento térmico causou degradação do material.

Apesar do PC estar sendo estudado há mais de 45 anos, ainda existem muitas controvérsias sobre seus mecanismos de degradação térmica. Medidas de viscosidade intrínseca, espectrometria de massa e cromatografia gasosa têm sido utilizadas para estudar os produtos voláteis oriundos de degradação térmica do PC. Os principais produtos voláteis da

degradação do policarbonato são dióxido de carbono e bisfenol-A e, em menor quantidade, monóxido de carbono, metano, fenol, difenil-carbonato e 2(4-hidroxifenil)-2-fenilpropano. As quebras subseqüentes do bisfenol-A geram etil-fenol, isopropenilfenol, isopropilfenol e cresol (ROBERTSON, 2001).

Se os produtos voláteis forem continuamente removidos do sistema durante o aquecimento, o PC passa a sofrer ramificação (*crosslinking*) e forma um gel insolúvel; caso contrário, observa-se cisões de cadeia. O PC de bisfenol-A usualmente tem nas extremidades de sua estrutura o grupo fenil ou hidroxil. A degradação inicial começa nestes grupos finais que reagem com qualquer hidrogênio livre presente, como água ou grupos hidroxil livres, formando os mesmos produtos. Robertson (2001) reporta que o grupo carbonato é o principal ponto de degradação em temperaturas abaixo de 400°C, enquanto que para altas temperaturas, o grupo isopropilideno é também susceptível à perda do radical metil. Abaixo de 500°C, nenhuma reação de radical livre é observada para o grupo carbonato, prevalecendo rearranjos da mistura carbonato. Também foi verificado que no ar, com temperaturas excedendo 380°C e tempo superior a 15 horas, ocorre *crosslinking*.

As Equações 10 a 14 mostram reações de degradação do PC. O *crosslinking* ocorre nas Equações 10 e 11, enquanto que a gelatinação somente ocorrerá se os produtos voláteis das Equações 11, 12 e 13 forem suprimidos do sistema. Caso contrário, as cisões predominam.



Segundo Robertson (2001), a degradação do PC pode ser randômica e ocorrer predominantemente nos grupos carbonatos finais da cadeia polimérica. A partir de 300°C a degradação térmica inicia-se e a viscosidade começa a diminuir de valor. Alguns estudos mostram que a degradação do PC ocorre em 3 estágios, começando pela oxidação em

temperaturas de 300-320°C, onde é observado o ataque do grupo isopropildieno pelo oxigênio em processos envolvendo radicais livres; tal processo é retardado empregando-se atmosfera de nitrogênio como também eliminando as moléculas de água da amostra. O segundo estágio é na faixa 340-380°C, depolimerização, consistindo de hidrólise e alcoólise do éster carbônico, que é uma forma de troca de éster em que as cadeias se rompem numa região próxima ao meio da cadeia. A hidrólise produz CO₂ e também bisfenol-A (se ocorrer próxima ao final da cadeia) ou produz duas cadeias menores. No terceiro estágio, que ocorre em altas temperaturas (480-600°C), dominam as reações de cisões de cadeia, de forma complexa e aleatória. Estas consistem de decarboxilação, hidrólise, abstração de hidrogênio, cisões de cadeia e, algumas vezes *crosslinking*.

4.7 Variação da transmitância no UV-Vis do vidro soda-cal irradiado

4.7.1 Análise química por fluorescência de raios-X e medidas de densidade

As amostras de vidro analisadas apresentaram densidade média de $2,50 \pm 0,01$ g/cm³. A Tabela 13 mostra os resultados de análise química semi-quantitativa por fluorescência de raios-X das amostras investigadas, incluindo dados da literatura para comparação. Observa-se que as amostras de vidro exibiram frações dos óxidos majoritários típicos de vidros soda-cal. Essas amostras apresentaram metais alcalinos e alcalinos terrosos, além de uma pequena quantidade de metais de transição. Foi encontrada maior quantidade de Na₂O e CaO nas amostras investigadas em relação à literatura; esses óxidos diminuem a

temperatura de fusão da massa vítrea e facilitarem o processo de manufatura do isolador elétrico (ALVES et al., 2001). Também foi observado, em comparação aos dados da literatura, maior teor dos óxidos MgO e Al₂O₃, normalmente adicionados ao vidro para aumentar a durabilidade e melhorar as condições de processamento (ALVES et al., 2001).

Tabela 13. Composição química semi-quantitativa por FRX das amostras de vidro.

Composição (% massa)				Suszynska; Macalik (2001)	Kowal et al. (2000)	Zheng et al. (1988)	Alves et al. (2001)
SiO ₂	59,88	±	0,12	74,0	73,5	74,1	71,0–73,0
Na ₂ O	16,55	±	0,18	13,0	13,8	11,1	12,0–14,0
CaO	10,05	±	0,04	6,4	6,5	6,1	10,0–12,0
MgO	5,44	±	0,14	4,5	4,5	3,7	1,0–4,0
K ₂ O	3,15	±	0,03	0,2	---	0,4	---
Al ₂ O ₃	2,96	±	0,02	1,4	---	2,2	0,5–1,5
BaO	1,48	±	0,10	---	---	---	---
SO ₃	0,34	±	0,01	---	---	---	---
P ₂ O ₅	0,05	±	0,01	---	---	---	---
Fe ₂ O ₃	0,04	±	0,01	---	0,15	---	---
SrO	0,03	±	0,01	---	---	---	---
Outros	0,03	±	0,01	0,5	1,55	2,4	---

4.7.2 Densidade óptica e espectroscopia de ultravioleta-visível

Após a irradiação gama, as amostras de vidro – que inicialmente eram incolores – adquiriram coloração escura, variando do marrom claro (para as doses menores) até o marrom escuro (doses maiores), quantificadas por medidas de densidade óptica (Figura 49).

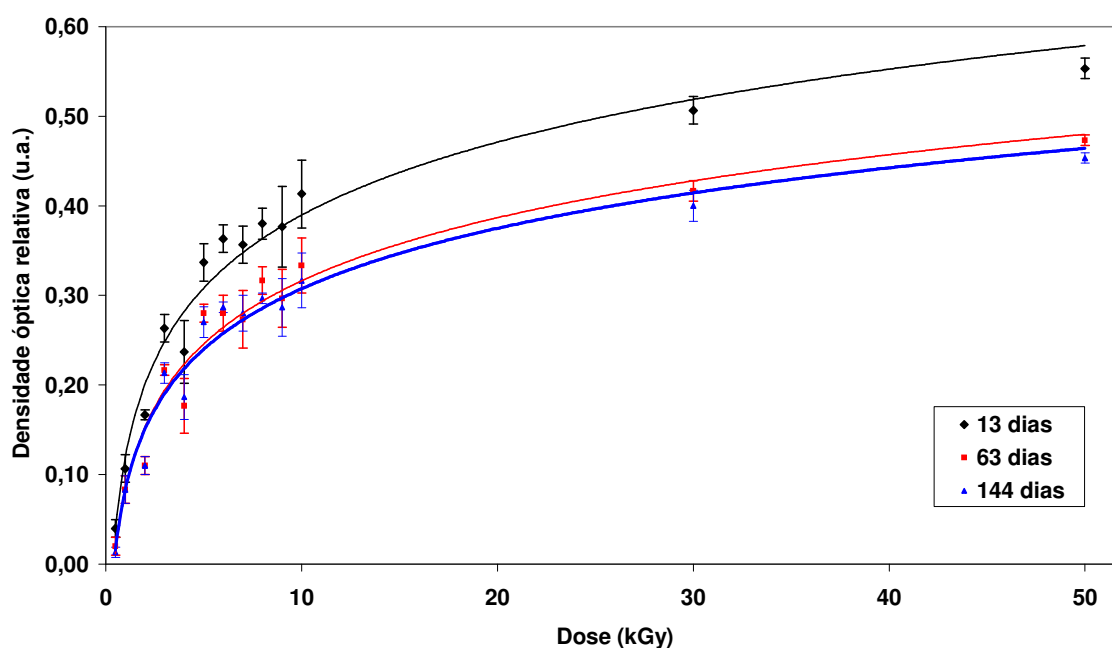


Figura 49. Valores de densidade óptica versus dose de radiação- γ para as amostras de vidro.

O aumento da dose de irradiação causou o crescimento da absorção óptica, tendendo à saturação acima da dose de 30 kGy. Como discutido no capítulo 2, as mudanças na absorção óptica estão relacionadas com algumas reações de oxidação-redução estimuladas pelos processos de irradiação e *fading* (SUSZYNSKA; MACALIK, 2001). Assim, a saturação observada na absorção óptica sugere que todos os íons contidos na amostra já foram reduzidos ou que nenhum defeito adicional tenha se formado no material para a taxa de dose aplicada (KOWAL et al., 2000).

Observa-se ainda pela Figura 49 que em função do *fading* houve uma diminuição da densidade óptica das amostras; a Figura 50 mostra medidas de densidade óptica relativa em função do tempo de *fading* para as doses de 1, 10, 30 e 50 kGy. A perda de cor tendeu à estabilização em torno de 40 dias após a irradiação.

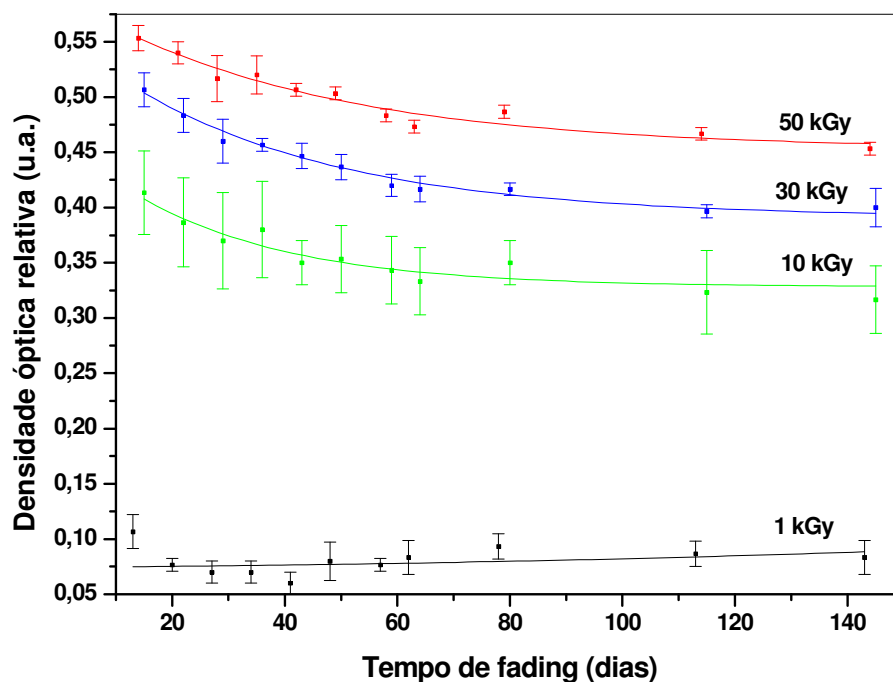


Figura 50. *Fading* ocorrido em temperatura ambiente nas amostras de vidro após a irradiação-γ, observada por medidas de densidade óptica relativa a amostra não irradiada.

A densidade óptica das amostras irradiadas diminuiu rapidamente nas primeiras semanas (curto-prazo), seguida de uma diminuição mais lenta no longo-prazo; este *fading* foi mais rápido nas amostras irradiadas com doses baixas, como pode ser visto pela Tabela 14. Isto indica que doses menores causaram a indução de um menor número de centros de cores no vidro, ocasionando um comportamento de *fading* muito mais rápido. Por outro lado, as maiores doses de radiação-γ acarretaram um longo *fading* provavelmente porque a concentração de defeitos criados (NBOHC's) foi maior, e isto é devido ao maior tempo de irradiação.

Os espectros UV-Vis das amostras irradiadas estão apresentados na Figura 51 (para 13, 62 e 440 dias após a irradiação). Verifica-se que para as amostras não irradiadas, ocorre absorção total abaixo de 292 nm (*cut-off*). As amostras irradiadas tiveram o *cut-off* deslocado para a região visível do espectro eletromagnético, de forma a superar 500 nm para as doses acima de 10 kGy.

Tabela 14. *Fading* ocorrido nas amostras de vidro, durante as primeiras semanas após irradiação- γ , medido pelas variações na densidade óptica das amostras como função da dose de irradiação.

Dose (kGy)	Densidade óptica média relativa*		Variação (%)
	13 dias de tempo de <i>fading</i>	34 dias de tempo de <i>fading</i>	
0,5	0,04	0,02	50,0
1	0,11	0,07	36,4
2	0,17	0,13	23,5
3	0,23	0,20	13,0
4	0,27	0,24	11,1
5	0,34	0,31	8,9
6	0,36	0,32	11,1
7	0,36	0,31	13,9
8	0,36	0,32	11,1
9	0,38	0,34	10,5
10	0,41	0,38	7,3
30	0,51	0,46	9,8
50	0,55	0,52	5,5

* Relativa à amostra não irradiada.

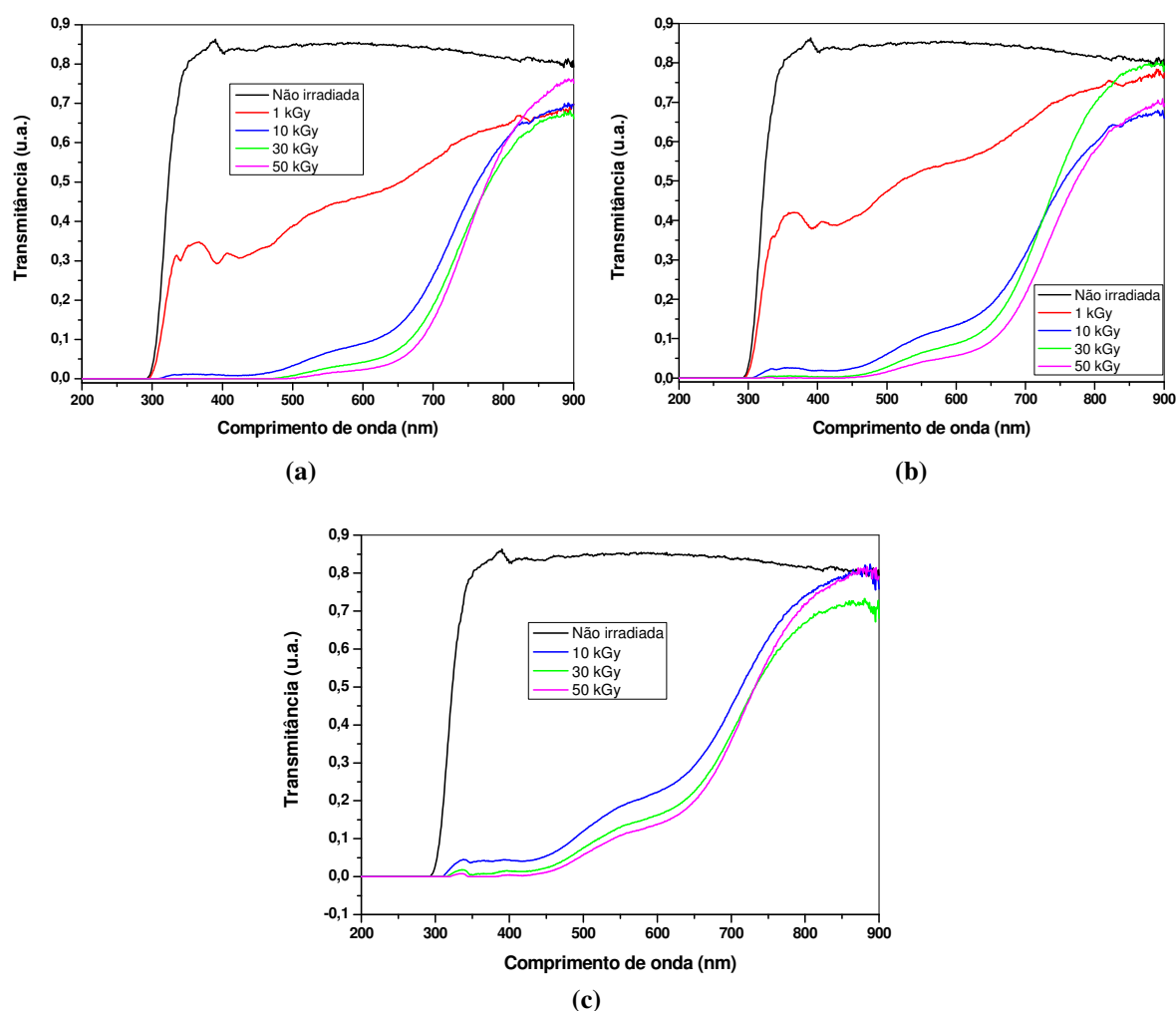


Figura 51. Espectros de UV-Vis induzidos pelos raios- γ nas amostras de vidro irradiadas em diferentes doses. (a) Medições feitas com 13 dias após a irradiação. (b) Medições feitas com 62 dias após a irradiação. (c) Medições feitas com 440 dias após a irradiação.

De acordo com Suszynska e Macalik (2001), a presença de íons férricos (Fe^{3+}) nas amostras de vidro estudadas foi identificada pela fraca banda de absorção em 390 nm; vidros soda-cal com alto teor de óxido férrico normalmente exibem coloração esverdeada, mas as amostras estudadas eram transparentes.

Segundo a literatura, duas bandas características de vidros soda-cal irradiados, com grande concentração de Na^+ , apresentam bandas na região visível, em 420 nm e 630 nm aproximadamente. De fato, a análise química indicou maior quantidade de Na_2O em relação a vidros soda-cal da literatura. Essas bandas foram confirmadas nas amostras estudadas e se mantiveram relativamente constantes ao longo do tempo de *fading* (Figura 52), mudando-se apenas sua intensidade. Com o aumento da dose, estas bandas ficaram menos evidentes. Valores semelhantes foram encontrados por Suszynska e Makalik (2001) e Sheng et al. (2002). Os espectros UV-Vis das doses entre 0,5 kGy e 9 kGy tiveram formatos semelhantes aos mostrados na Figura 52, e estão na seção de Apêndices.

Ao longo do tempo de monitoramento das amostras irradiadas, observou-se a ocorrência do *fading* para todas as doses. Para amostras que receberam dose de 50 kGy, a banda em 420 nm foi observada apenas a partir do 66º dia de tempo de *fading*. Para a dose de 30 kGy, esta banda tornou-se evidente apenas a partir do 45º dia de tempo de *fading*, e foram atribuídas aos NBOHC's, os principais centros de cor observáveis em vidros soda-cal, conforme Sheng e colaboradores (2002).

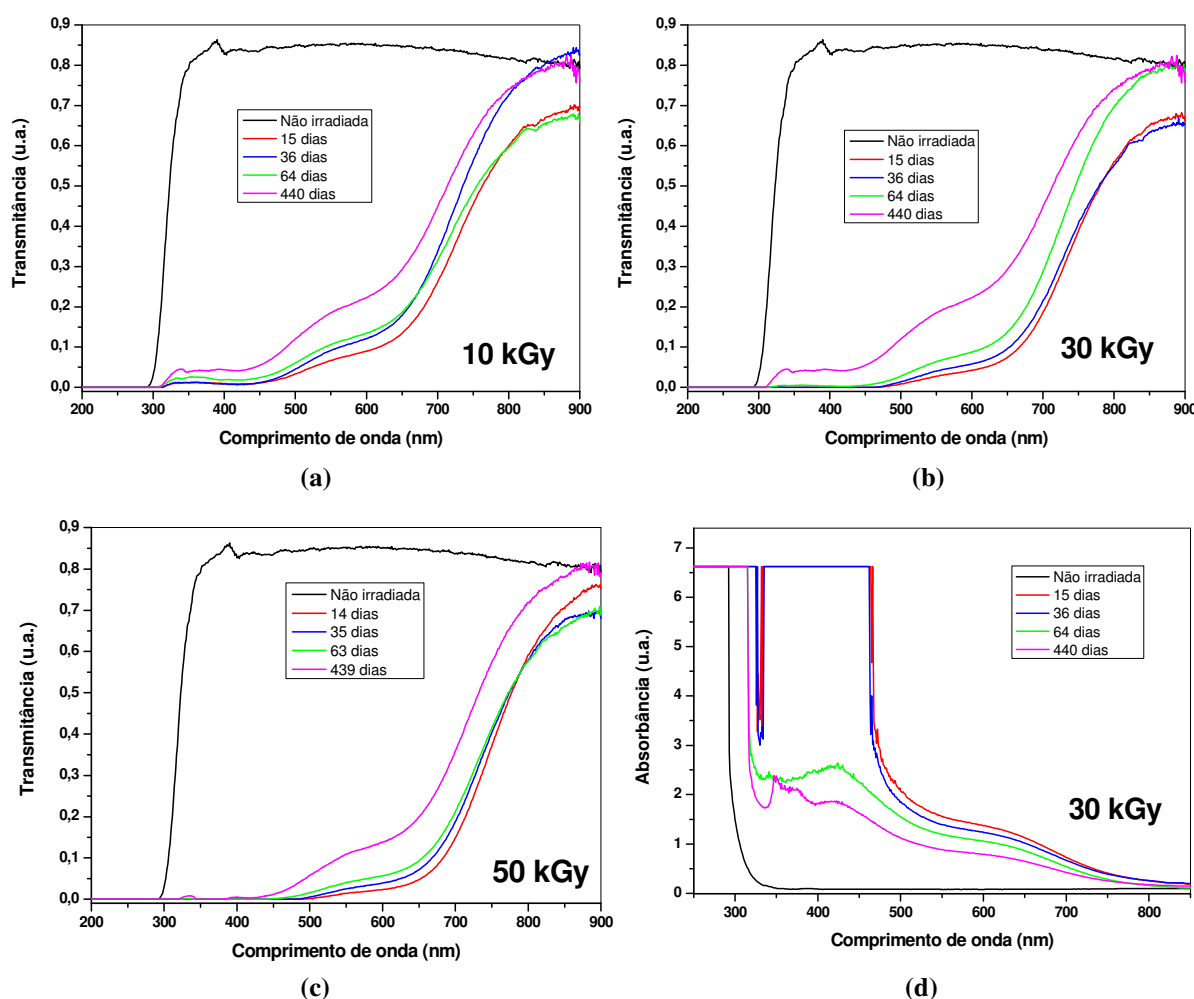
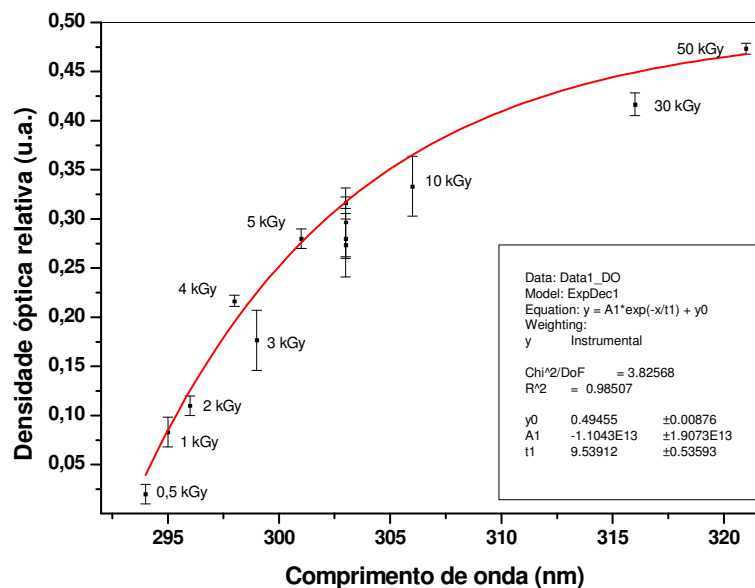


Figura 52. Espectros de UV-Vis das amostras de vidro para doses de irradiação, medidos ao longo do tempo de fading. (a) 10 kGy. (b) 30 kGy. (c) 50 kGy. (d) 30 kGy em termos de absorbância.

Algumas bandas apareceram a partir do 38º dia de tempo de *fading* em 330 nm (para dose de 30 kGy) e entre 320 nm e 440 nm (para 50 kGy). Nas demais amostras (0,5 kGy a 10 kGy), a irradiação praticamente não afetou os tipos de centros de cores, nem a forma de seus espectros, mas apenas a sua população. Uma vez que os defeitos (centros de cores) criados pela irradiação gama foram desfeitos durante o *fading* em temperatura ambiente, o comprimento de onda de corte (*cut-off*) foi deslocado em direção à posição inicial (vidro não irradiado), de forma que o ganho na absorção UV foi gradativamente perdido, mas para dose de 50kGy permaneceu acima de 400 nm, isto é, na região visível do espectro eletromagnético.

A densidade óptica e o *cut-off* apresentaram boa correlação exponencial, com $r^2 = 0,99$ (Figura 53).



(a)

Figura 53. Correlação entre densidade óptica relativa e *cut-off* no UV das amostras de vidro soda-cal, medidas após 63 dias de tempo de *fading*.

4.7.3 Espectroscopia de infravermelho

A Figura 54 mostra os espectros de infravermelho para as amostras de vidro; observa-se a presença de bandas de absorção em torno de 3500 cm^{-1} e 2800 cm^{-1} , além de uma fraca banda próxima de 4500 cm^{-1} , atribuídas ao grupo O–H; normalmente, a existência de bandas de absorção O–H em vidros silicatos ocorre em torno de 2750 nm . É possível identificar que a variação na dose de irradiação não tem efeito sobre a transmitância no infravermelho das amostras de vidro soda-cal, pois todas as curvas apresentaram formato e valores semelhantes.

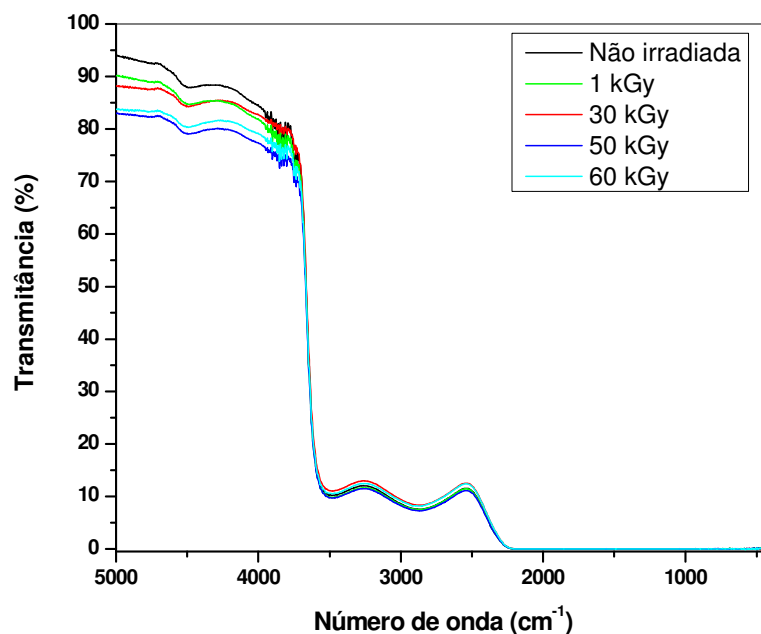


Figura 54. Espectros de transmitância no infravermelho para as amostras de vidro soda-cal.

4.7.4. Efeito da temperatura na transmitância dos raios UV

Sabendo que o tratamento térmico dos vidros soda-cal pode retirar os defeitos criados pela irradiação gama, amostras de vidro foram irradiadas com dose de 2 kGy e em seguida foram obtidas as curvas de emissão termoluminescente (TL), mostradas na Figura 55. A partir de 100°C, inicia-se o processo de emissão TL, alcançando o pico de emissão em torno de 230°C.

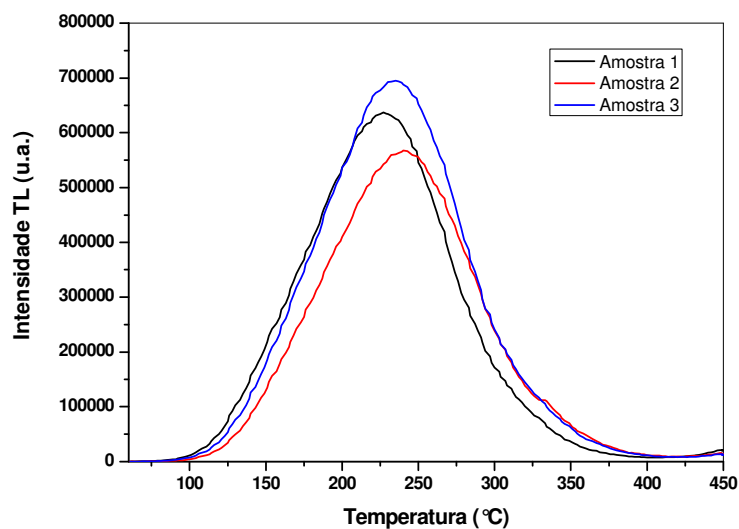


Figura 55. Curvas de emissão TL para amostras de vidro soda-cal.

Considerando que a temperatura de um isolador de vidro instalado numa LT não ultrapassa 70°C, foi realizado também um tratamento térmico após 154 dias de irradiação nas amostras de vidro soda-cal, a 70°C por 7 dias; foram obtidos os espectros de transmissão no UV-Vis (Figura 56). Os resultados indicaram que a absorção UV obtida pela irradiação- γ é mantida após o tratamento térmico a 70°C.

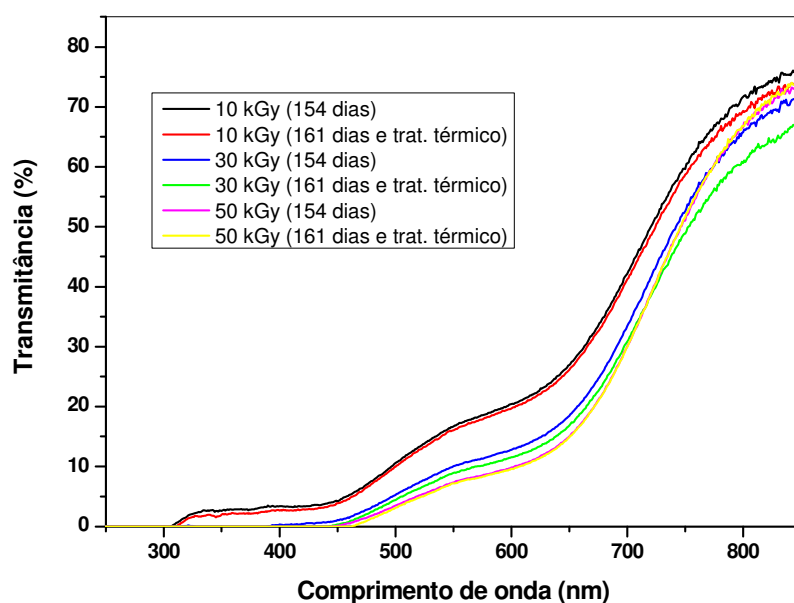


Figura 56. Comparação dos espectros de UV-Vis das amostras de vidro sem e com tratamento térmico, para doses de irradiação de 10, 30 e 50 kGy, medidos após 154 e 161 dias de irradiação.

Estes resultados servem para esclarecer que uma vez desfeitos parte dos centros de cor nos primeiros meses pós-irradiação, isto é, tendo o *fading* atingido estabilidade, o vidro consegue manter estáveis os defeitos remanescentes em temperatura inferior a 100°C. Isto poderia assegurar que um isolador de vidro exposto diariamente aos raios solares durante sua vida útil nas LT's manteria suas propriedades ópticas estáveis sob efeito da temperatura.

4.8 Obtenção do protótipo

O sistema “simbiótico” proposto para LT's de 230 kV é formado por um isolador de vidro absorvedor de raios UV mais escudo balístico contra o vandalismo (Figura 57).

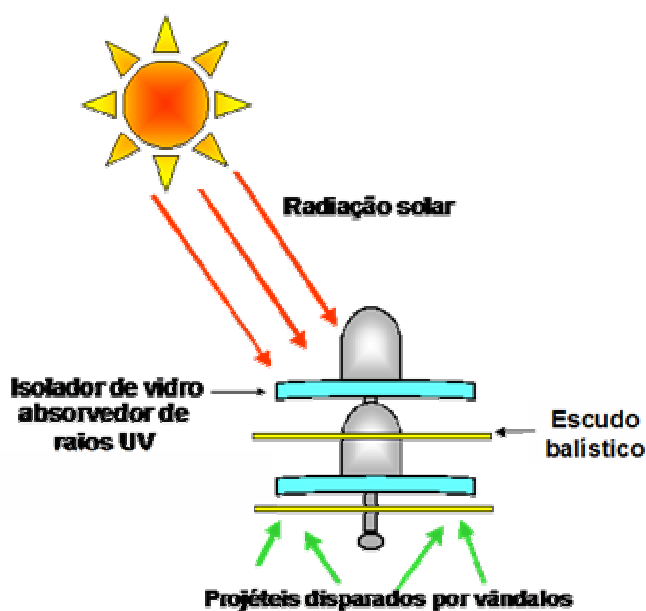


Figura 57. Esquema do sistema “simbiótico” para LT's.

Com base nos resultados alcançados neste trabalho, o primeiro protótipo do sistema simbiótico para LT's foi obtido (Figura 58), sendo constituído de um isolador de

vidro irradiado e escudo balístico (nas opções de PC 6mm, compósito epóxi-vidro de 3 ou 10 mm).

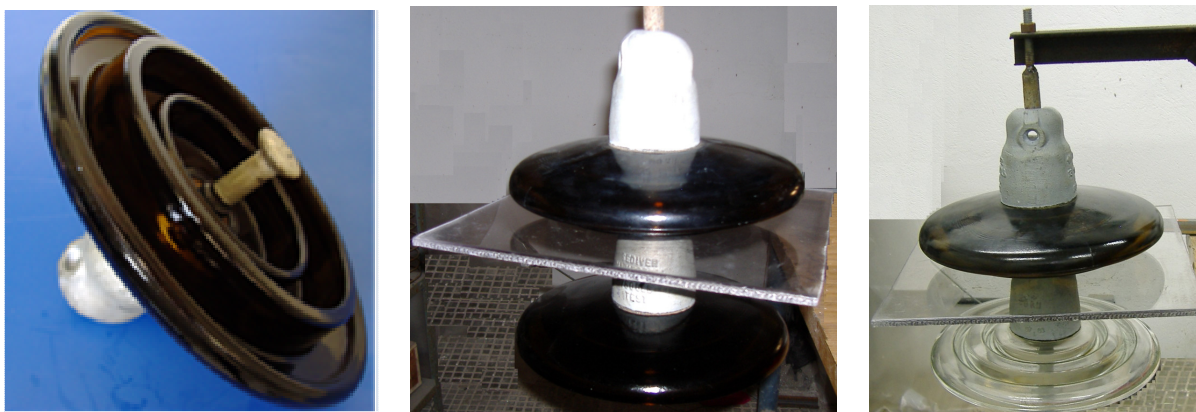


Figura 58. Isoladores de vidro irradiados com escudo balístico para LT's.

O isolador de vidro foi irradiado com dose de 10 kGy, nas mesmas condições experimentadas pelas amostras de vidro de 10 kGy. Pela sua coloração marrom adquirida, um isolador de vidro irradiado se assemelha fisicamente a um isolador de porcelana, que é menos visado pelos vândalos pelo fato de não se estilhar quando alvejado por tiros.

4.8.1. Determinação do valor econômico do produto

De acordo com informações da CHESF (2007), o preço de venda de um isolador de vidro inteiro gira em torno de R\$ 50,00. Numa linha de 230 kV são necessários 16 isoladores de vidro; logo, o preço de uma cadeia de isoladores vale R\$ 800,00. O preço de uma cadeia de isolador compósito para linha de 230 kV é de aproximadamente R\$ 1.000,00.

A Tabela 15 mostra os valores comparativos para os escudos balísticos de PC e compósito. Como as amostras de compósito foram doadas, não se sabe o preço de venda do

material, mas pelo valor do custo obtido pode-se ter uma boa aproximação do preço de compra mínimo do produto. Para a CHESF, diante das exigências da Agência Nacional de energia elétrica (ANEEL), a aplicação de multas como a Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI)⁵ pode superar o valor do faturamento mensal de uma LT. Como exemplo, seguem abaixo valores típicos para uma linha de 230 kV, fornecidos pela CHESF:

- a) receita mensal: R\$ 380.000,00;
- b) multas por desligamento não programado: R\$ 81.000,00 (para 1 h), R\$ 400.000,00 (para 5h), R\$ 551.000,00 (para 24 h).

Tabela 15. Comparação entre escudos balísticos de PC e compósito para obtenção do preço do escudo.

Propriedade	Polycarbonato 6 mm	Compósito 3 mm	Compósito 10 mm
Volume ⁶ (cm ³)	540 cm ³	270 cm ³	900 cm ³
Massa específica (g/cm ³)	1,20	1,97	1,97
Massa (g)	648	532	1773
Custo de fabricação	NI	188	275
Preço de compra (R\$/m ²)	300	MD	MD
Preço do escudo (R\$/unid.)	34,00	Acima de 21	Acima de 31

MD: Material doado.

NI: Não informado.

Nota-se que em menos de 5 horas o valor da multa supera o faturamento mensal da LT. Se as empresas de energia elétrica buscam constantemente melhorar a disponibilidade das instalações de transmissão, o uso de escudos balísticos em isoladores de vidro pode contribuir para a redução dos desligamentos não programados causados pelo vandalismo, e tendo em vista os altos valores de multas aplicadas pela ANEEL, o preço de compra de um escudo torna-se irrisório.

⁵ Parcela a ser deduzida do Pagamento Base por Desligamentos Programados ou Outros Desligamentos decorrentes de eventos envolvendo o equipamento principal e/ou os complementares da Função Transmissão, de responsabilidade da concessionária de transmissão. Esta parcela integra a Resolução Normativa n° 270 de 26 de junho de 2007, que estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da Rede Básica.

⁶ Considerando escudo com formato quadrado com 30 cm de lado, furo central de 6,8 cm de diâmetro.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo induzir a absorção UV de vidros soda-cal sílica por irradiação gama, como também avaliar as propriedades mecânicas, elétricas e a microestrutura do PC, com e sem tratamento térmico, e do compósito epóxi-vidro, com a finalidade de se obter um protótipo para LT's composto por uma cadeia de isoladores de vidro absorvedor de radiação UV solar e escudos balísticos contra a quebra da parte vítrea por vandalismo. Assim, alguns resultados levaram às seguintes conclusões:

- a) o processo de irradiação gama induz a absorção UV nos vidros soda-cal; para dose acima de 50 kGy o vidro absorve completamente a radiação UV mesmo durante tempo de *fading* e após a estabilização da perda de cor;
- b) as linhas de costura de poliéster do compósito epóxi-vidro são agentes facilitadores da disrupção elétrica. Mesmo assim, o compósito se comporta como um excelente dielétrico;
- c) os escudos de PC não prejudicam o desempenho elétrico da cadeia de isoladores de vidro na condição de isolamento mínimo; para minimizar custos, recomenda-se colocação de escudos nos isoladores localizados em posições estratégicas (sendo o melhor arranjo a distribuição uniforme ao longo da cadeia);
- d) o ensaio de rigidez dielétrica é uma técnica eficaz para avaliar a integridade microestrutural dos materiais dielétricos;
- e) embora a análise termogravimétrica não tenha apontado degradação térmica no PC entre as temperaturas T_g e T_m , as alterações verificadas nas propriedades elétricas, mecânicas e na microestrutura indicam que o tratamento térmico a 180°C degrada (fragiliza) o PC;
- f) o dispositivo de impacto construído especialmente para testar a quebra de isoladores de vidro e escudos balísticos é um ensaio laboratorial representativo da energia de impacto de revólver 38 de um ensaio balístico;

- g) na espessura de 6 mm, os escudos de PC são adequados para proteger isoladores de vidro contra tiros de revólver 38, porém podem se fragmentar após sucessivos disparos;
- h) a delaminação das camadas ocorrida no compósito epóxi-vidro após perfuração balística tem um papel importante na absorção de energia do projétil fragmentado no interior do material;
- i) o compósito epóxi-vidro é preferível para a confecção do escudo balístico para isoladores de vidro em relação ao PC;
- j) o custo do escudo balístico torna-se irrisório se comparado ao valor da multa aplicada pela ANEEL pelo tempo que a LT permanece inoperante.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Avaliar materiais de alta resistência ao impacto comparativamente ao compósito epóxi-vidro (ex.: compósito de fibra de aramida).
- b) Investigar os produtos voláteis e não-voláteis do PC responsáveis pela formação de bolhas no material, utilizando técnicas tais como espectrometria de massa, cromatografia gasosa, análise de volatilização térmica e determinação do peso molecular médio.
- c) Sintetizar compósitos poliméricos com trama tridimensional; monitorar a cura por ultrasonografia e avaliar suas propriedades mecânicas em função do grau de cura.
- d) Avaliar a degradação em compósitos poliméricos pela ação de radiação solar, temperatura, umidade, poluição, oxidação.
- e) Utilizar a técnica de radiografia computadorizada no material compósito para inspeção não destrutiva das placas recém-laminadas e para caracterização dos fragmentos de chumbo espalhados após teste balístico.
- f) Levantar a curva de distribuição de probabilidade de falha (Weibull) do PC e compósito epóxi-vidro através de medidas de ruptura elétrica e correlacionar resultados com os ensaios de tração.
- g) Conduzir ensaios de tração com alta velocidade de aplicação de carga e correlacionar resultados com os ensaios de impacto Charpy.

7 TRABALHOS PUBLICADOS

- 1) YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., SUZUKI, C. K. Microstructure study of glass fiber-epoxy composites for wind turbines. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA EM MATERIAIS, 6, 2007, Natal. **Anais...** Natal: SBPMAT, 2007. 1 CD-ROM.
- 2) SILVA, R. J. F., YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., SUZUKI, C. K. Anomalous effect in high dose gamma-ray irradiated windows glass observed by the ultraviolet spectroscopy In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA EM MATERIAIS, 6., 2007, Natal. **Anais...** Natal: SBPMAT, 2007. 1 CD-ROM.
- 3) FUJIWARA, F., YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H. Characterization of glass fiber reinforced epoxy composite for high voltage applications by the electric strength measurements technique In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA EM MATERIAIS, 6., 2007, Natal. **Anais...** Natal: SBPMAT, 2007. 1 CD-ROM.
- 4) SHINOHARA, A. H., SANTANA, D. M. F., SILVA, R. G., MAGALHÃES, O. H., LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., KHOURY, H. J., WAVRIK, J. A. F., BRANCO, F. M. A. C., GALINDO, T. C. L. Aplicação da radiografia digital como técnica preditiva para diagnóstico dos equipamentos de linhas de transmissão e subestações In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 4., 2007, Araxá. **Anais...** Araxá: CEMIG, 2007. 1 CD-ROM (Menção honrosa 3º lugar).
- 5) YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., SILVA, R. J. F., MAGALHÃES, O. H., SANTANA, D. M. F., OSSANAI, L. Radiografia Digital Industrial em Compósito Polimérico Avançado de Pás Eólicas In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 9., 2007, Salvador. **Anais...** São Paulo: Monferrer Produções LTDA, 2007. 1 CD-ROM.
- 6) YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., SILVEIRA, C. G. Ensaios de alta-tensão e caracterização microestrutural do policarbonato In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4., 2006, Recife. **Anais...** Recife: Cadena Organização Multimídia, 2006. 1 CD-ROM.
- 7) YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., FERRAZ, D. P. Impact and ballistic testing of polycarbonate for protection of glass insulators in transmission lines In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18., 2005, Ouro Preto -MG. **Anais...** São Paulo: ABCM, 2005. 1 CD-ROM.
- 8) LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., XAVIER, G. J. V. Efeito da porosidade do cimento na tensão disruptiva de isoladores de vidro para linhas de transmissão In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49., 2005, São Pedro. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2005. 1 CD-ROM.
- 9) YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., SCHWARTZ, M. O. E., KHOURY, H. J. Estudo do efeito da irradiação gama nas propriedades ópticas de vidros soda-cal In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49., 2005, São Pedro. **Anais...** São Paulo: ABCerâmica, 2005. 1 CD-ROM.

10) YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., LEITE, L. R. P., XAVIER, G. J. V., MACIEL, D. A. Polycarbonate protector for glass insulators in transmission lines to minimize glass sheds breaking by the vandalism In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Guaratinguetá: Fundação Biblioteca Nacional, 2005, ISBN: 85-903471-2-5.

11) SHINOHARA, A. H., LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., FERRAZ, D. P., XAVIER, G. J. V., MACIEL, D. A. Polymeric jacket to increase the electrical breakdown voltage of broken glass insulator In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Guaratinguetá: Fundação Biblioteca Nacional, 2005, ISBN: 85-903471-2-5.

12) LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., COSTA, E. G., XAVIER, G. J. V., MACIEL, D. A. Avaliação da tensão disruptiva de cadeias de isoladores de vidro com unidades danificadas em atmosfera de ar e gás SF₆ In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Guaratinguetá: Fundação Biblioteca Nacional, 2005, ISBN: 85-903471-2-5.

13) SHINOHARA, A. H., LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., MAGALHÃES, O. H., KHOURY, H. J., BRANCO, F. M. A. C., WAVRIK, J. A. F., PORTO, M. A. L., GALINDO, T. C. L. Radiografia Computadorizada de alta definição para avaliação dos isoladores de vidro empregados em linhas de transmissão In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Guaratinguetá: Fundação Biblioteca Nacional, 2005, ISBN: 85-903471-2-5.

14) LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., FERRAZ, D. P., COSTA, E. G., XAVIER, G. J. V., MACIEL, D. A. Estudos de cadeias de isoladores de vidro parcialmente danificadas por vandalismo - Parte III: performance na atmosfera de SF₆ e ar sob pressão In: IEEE PES T&D 2004 LATIN AMERICA, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEEE, 2004. 1 CD-ROM.

15) LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., XAVIER, G. J. V., MACIEL, D. A., COSTA, E. G. Estudos de cadeias de isoladores de vidro parcialmente danificadas por vandalismo - Parte I: avaliação experimental das tensões de ruptura In: IEEE PES T&D 2004 LATIN AMERICA, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEEE, 2004. 1 CD-ROM.

16) YANAGUIZAWA, J. A.; LEITE, L. R. P.; SHINOHARA, A. H.; XAVIER, J. G. V.; MACIEL, D. A. Study of electrical breakdown voltage in a partially damaged glass insulators chain with polycarbonate protectors. **IEEE Xplore Release 2.5**, 2004, p.727 – 730. ISBN: 0-7803-8775-9.

17) YANAGUIZAWA, J. A.; SHINOHARA, A. H.; SILVA, R. J. F.; KHOURY, H. J.; SCHWARTZ, M. O. E.; SUZUKI, C. K. Characterization of gamma irradiated soda-lime silica glass by UV-VIS spectroscopy. **Cerâmica** (em revisão).

18) YANAGUIZAWA, J. A.; SHINOHARA, A. H.; SILVA, R. J. F.; MAGALHÃES, O. H.; SANTANA, D. M. F.; OSSANAI, L. Nondestructive inspection of advanced polymeric composite using digital radiography and imaging plate system. **J. Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering** (em revisão).

19) SHINOHARA, A. H.; LEITE, L. R.; YANAGUIZAWA, J. A. Experimental study of electrical breakdown voltage of a glass insulator chain with different numbers of broken units. **IEEE International Power Modulator Conference and High Voltage Workshop**, 27-31 mai, 2008 (resumo aceito).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVES, A. L. S.; NASCIMENTO, L. F. C.; SUAREZ, J. C. M. Comportamento balístico de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular: efeito da radiação gama. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 14, n. 2, p. 105-111, abr/jun. 2004.

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

AMOSOV, A. V.; RYBALTOVSKY, A. O. Radiation color center formation in silica glasses: a review of photo- and thermo-chemical aspects of the problem. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Petersburg, v. 179, p. 226-234, 1994.

ANGELINI, J. M. G. **Estudo de tensões residuais em policarbonato moldado por injeção**. 1999. 119f. Tese (Doutorado em Engenharia Química – Área de Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

ARAÚJO, E. S. **Degradação e estabilidade radiolítica do policarbonato**. 1993. 123f. Tese (Doutorado em Ciências – Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

ARAÚJO, S.; KAWANO, Y. Espectro vibracional no infravermelho próximo dos polímeros poliestireno, poli(metacrilato de metila) e policarbonato. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 11, n. 4, p. 213-221, 2001.

BOERI, D. V.; BUIOCHI, F.; ADAMOWSKI, J. C.; Determinação das constantes elásticas de materiais compostos por ultra-som. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4., 2006, Recife. **Anais...** Recife: Cadena Organização Multimídia, 2006. 1 CD-ROM.

BOTELHO, E. C; REZENDE, M. C. Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 12, n. 3, p. 153-163, 2002.

CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. New York: John Wiley & Sons Inc., 6.ed, 2003, 848p.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artiliber Editora, 2002. 183p.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE. **Tucuruí-Altamira, da Eletronorte: doze municípios ficam sem energia elétrica**. Disponível em: <http://ces.fgvsp.br/index.cfm?fuseaction=noticia&IDnoticia=70270&IDidioma=1&IDassunto=35>>. Acesso em 21 mai. 2007.

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. **SILT Sistema de Informações de Linhas de Transmissão**. Recife: CHESF, 2001, [s.p.].

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. **SILT Sistema de Informações de Linhas de Transmissão**. Recife: CHESF, 2007, [s.p.].

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos com resina epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 11, n. 4, p. 182-189, 2001.

COSTA, M. L.; PAIVA, J. M. F.; REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. Avaliação térmica e reológica do ciclo de cura do pré-impregnado de carbono/epóxi. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 13, n. 3, p. 188-197, 2003.

DIÁRIO DO PARÁ. **Vandalismo deixa cidade do sul do Pará sem energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.diariodopara.com.br/Edicoes/2007/05/16/Index.asp>> Acesso em 16mai. 2007.

DIEPENS, M.; GIJSMAN, P. Photodegradation of bisphenol-A polycarbonate. **Polymer Degradation and Stability**, Eindhoven, v. 92, p. 397-406, 2007.

DISSADO, L. A; FOTHERGILL, J. C. **Electrical degradation and breakdown in polymers**. Londres: Peter Pelegrinus Ltd., 1992. 601p.

DUARTE, J. V. P. **Danos à camada isolante de cabos em redes não blindadas devido a distorções do campo elétrico na proximidade de objetos aterrados**. Apostila da disciplina Teoria Eletromagnética da UFMG, 2001.

DUBEY, V.; BAJPAI, R.; DATT, S. C. Effect of gamma and electron irradiation on the mechanical strength of glass fibre reinforced polymer (GFRP). **Polymer Testing**, Jabalpur, v. 11, p. 61-70, 1992.

EHRT, D.; VOGEL, W. Radiation effects in glasses. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Jena, v. 65, p. 1-8, 1992.

ELETROSUL. 2007. **Blecaute atinge 11 cidades**. Disponível em: <http://www.eletrosul.gov.br/gdi/gdi/cl_pesquisa.php?pg=cl_abre&cd=gnjeeh79%7DOeic>. Acesso em 21 mai. 2007.

ESCOLA, M.A.; MOINA, C. A.; NIÑO GÓMEZ, A. C.; YBARRATHE, G. O. The determination of the degree of cure in epoxy paints by infrared spectroscopy. **Polymer Testing**, v. 24, n. 5, p. 572-575, 2005.

FREITAG; D.; NOUVERTNE, W. **Flame-resistant polycarbonates**. US n. 4.100.130, 11 julho 1978.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos S.A., 2000, 247p.

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

GEPLASTICS. **Lexan®: resina de policarbonato**. Disponível em: <<http://www.geoplastics.com.br/resins/materials/lexan.html>>. Acesso em: 14 set. 2005.

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.

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.

HENNESSEE, B. Boron-free E-glass reinforcement for HV insulating rods. **JEC Composites Magazine**, n. 20, p. 64-66, out/nov. 2005.

HIPÓLITO, F. G. V.; BONELLI, C. M. C.; SUAREZ, J. C. M. Comportamento na fratura de laminado epóxi/ fibra de vidro: efeito da exposição à radiação gama. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro, 2006.

JANG, B. N.; WILKIE, C. A. The thermal degradation of bisphenol-A polycarbonate in air. **Thermochimica Acta**, Milwaukee, v. 426, p. 73–84, 2005.

KAISERSBERGER, E.; KNAPPE, S.; MÖHLER, H.; RAHNER, S. Thermal analysis for polymer engineering. **NETZSCH Annual for Science and Industry**, v. 3, p.3-81, 1994.

KORTABERRIA, G., ARRUTI, P.; GABILONDO, N.; MONDRAGON, I. Modified with poly(methylmethacrylate) monitored by simultaneous dielectric/near infrared spectroscopies. **European Polymer Journal**, v. 40, n. 1, p. 129-136, 2004.

KOWAL, T. M.; KRAJCZYK, L.; MACALIK, B.; NIERZEWSKI, K.; OKUNO, E.; SUSZYNSKA, M.; SZMIDA, M.; YOSHIMURA, E. M. Some effects of γ -irradiation in soda-lime silicate glasses. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Wroclaw, v. 166-167, p. 490-494, 2000.

LEITE, L. R. P. **Melhoramento da tensão disruptiva de cadeias de isoladores de vidro para linhas de transmissão**. 2006. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Materiais e Fabricação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., XAVIER, G. J. V., MACIEL, D. A., COSTA, E. G. Estudos de cadeias de isoladores de vidro parcialmente danificadas por vandalismo - Parte I: avaliação experimental das tensões de ruptura In: IEEE PES T&D 2004 LATIN AMERICA, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEEE, 2004. 1 CD-ROM.

MAHFUZ, H.; BASEER, M. A.; RANGARI, V. K.; JEELANI, S. Fabrication, characterization and mechanical properties of nanophased carbon prepreg laminates. **SAMPE Journal**, Tuskegee, v. 41, n. 2, p. 40-48, mar/abr. 2005.

MCKEEVER, S. W. S. **Thermoluminescence of solids**. New York: Cambridge University Press, 2001, 376p.

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., 2001, Campinas. **Anais...** Campinas, 2001.

PAIVA, J. M. F.; MAYER, S.; REZENDE, M. C. Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. **Materials Research**, São José dos Campos, v. 8, n. 1, p. 91-97, 2005.

PAOLI, M. A. **Principais tipos de aditivos para termoplásticos e suas funções**: apostila. Campinas: Departamento de Química Inorgânica, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, s.d. Disponível em: <<http://lpcr.iqm.unicamp.br/arquivos/fretardantechama.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2007.

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

PIAZZA, F., SILVA, G. C., LEGUENZA, E. L., GULMINE, J. V., MUNARO, M., BRAGA, D., BORNANCIM, A., MELLO, J. S., NERI, P. J., TOMIOKA, J., SCARPA, P. C. N., GUPTA, D. K. D. Avaliação de cabos isolados em polietileno utilizados em redes subterrâneas utilizando ensaios de tensão de retorno. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 2000, Belém. **Anais...** Belém, 2000, 15 p.

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**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977, 382p.

RIEDEL, U.; KÖHNKE, B.; MAHRHOLZ, T.; MOSCH, J.; RÖSTERMUNDT, D.; HERBECK, L.; SINAPIUS, M. Advanced-fibre-reinforced nanocomposites. **JEC Composites Magazine**, Braunschweig, n.25, p. 57-59, mai/jun. 2006.

ROBERTSON, J. **Thermal degradation studies of polycarbonate**. 2001. 213 f. Tese (Doutorado em Filosofia em Engenharia Química) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virgínia, 2001.

RODRIGUES JUNIOR, 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**, California, v. 12, p. 275-288, 1985.

SANTA TEREZINHA. **Isoladores de vidro**. Disponível em: <www.cst-isoladores.com.br>. Acesso em 17 mai. 2007.

SARON, C.; FELISBERTI, M. I. Estabilidade térmica do policarbonato aditivado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15., 2002, Natal. **Anais...**, 2002.

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

SCHMIDT, W. **Materiais elétricos**: isolantes e magnéticos. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1986. 166p.

SECEX. SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR DO MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Policarbonato**. Circular n. 49, 05. ago. 2005, publicada no D.O.U. de 09/08/2005). Disponível em: <<http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivo/legislacao/cirsecex/2005>>. Acesso em 21 set. 2005.

SHAFFER, J.; PHILIPPIDIS, T. P.; VASSILOPOULOS, A. P. Polymer Composites. In: WESSEL, J. K. **Handbook of Advanced Materials**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004, p. 1-63.

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.

SHINOHARA, A. H.; YANAGUIZAWA, J. A.; LEITE, L. R. P.; MACIEL, D. A.; XAVIER, G. J. V. **Isolamento mínimo**. Relatório final do projeto de P&D CHESF/ANEEL, 2003.

SHINOHARA, A. H., LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., MAGALHÃES, O. H., KHOURY, H. J., BRANCO, F. M. A. C., WAVRIK, J. A. F., PORTO, M. A. L., GALINDO, T. C. L. Radiografia Computadorizada de alta definição para avaliação dos isoladores de vidro empregados em linhas de transmissão In: LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Guaratinguetá: Fundação Biblioteca Nacional, 2005, ISBN: 85-903471-2-5.

SHINOHARA, A. H., SANTANA, D. M. F., SILVA, R. G., MAGALHÃES, O. H., LEITE, L. R. P., YANAGUIZAWA, J. A., KHOURY, H. J., WAVRIK, J. A. F., BRANCO, F. M. A. C., GALINDO, T. C. L. Aplicação da radiografia digital como técnica preditiva para diagnóstico dos equipamentos de linhas de transmissão e subestações. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 4., 2007, Araxá. **Anais...** Araxá: CEMIG, 2007. 1 CD-ROM.

SIBLEY, W. A. Radiation processes in halide crystals and glasses. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Amsterdam, v. 32, p. 194-200, 1988.

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).

SINGH, N. L.; QURESHI, A.; SINGH, F.; AVASTHI, D. K. Modifications of polycarbonate induced by swift heavy ions. **Materials Science and Engineering A**, Vadodara, v. 457, p. 195-198, 2007.

SLOWINSKI, B.; ADAWI, A. Changes of properties of selected glasses irradiated with gamma rays and neutrons: a short overview. **Vacuum**, Otwock-Swierk, v. 63, p.585-589, 2001.

SOHN, S. **Crystallization behavior of bisphenol-A polycarbonate: effects of crystallization time, temperature and molar mass**. 2000. 246 f. Dissertação de mestrado, Virginia, 2000.

SP COMPOSITES. **The complete guide to composites**. 25 mai. 2007. Disponível em: <http://autospeed.com/cms/A_108672/article.html>. Acesso em 25 set. 2007.

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.

SUWANPRATEEB, J. A comparison of different methods in determining load- and time-dependence of Vickers hardness in polymers. **Polymer Testing**, Bangkok, v. 17, p. 495-506, 1998.

TANAKA, T. Space charge injected via interfaces and tree initiation in polymers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.8, n. 5, 2001.

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.

TENNYSON, R. C.; LAMONTAGNE, C. Hypervelocity impact damage to composites. **Composites: Part A**, Toronto, v. 31, p. 785-794, 2000.

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.

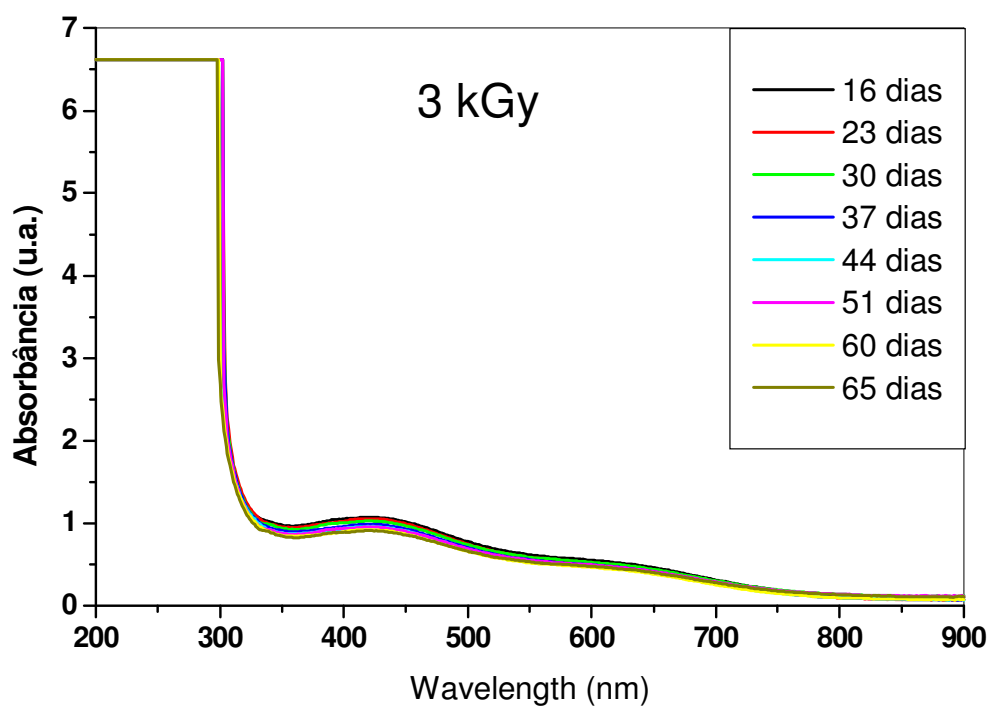
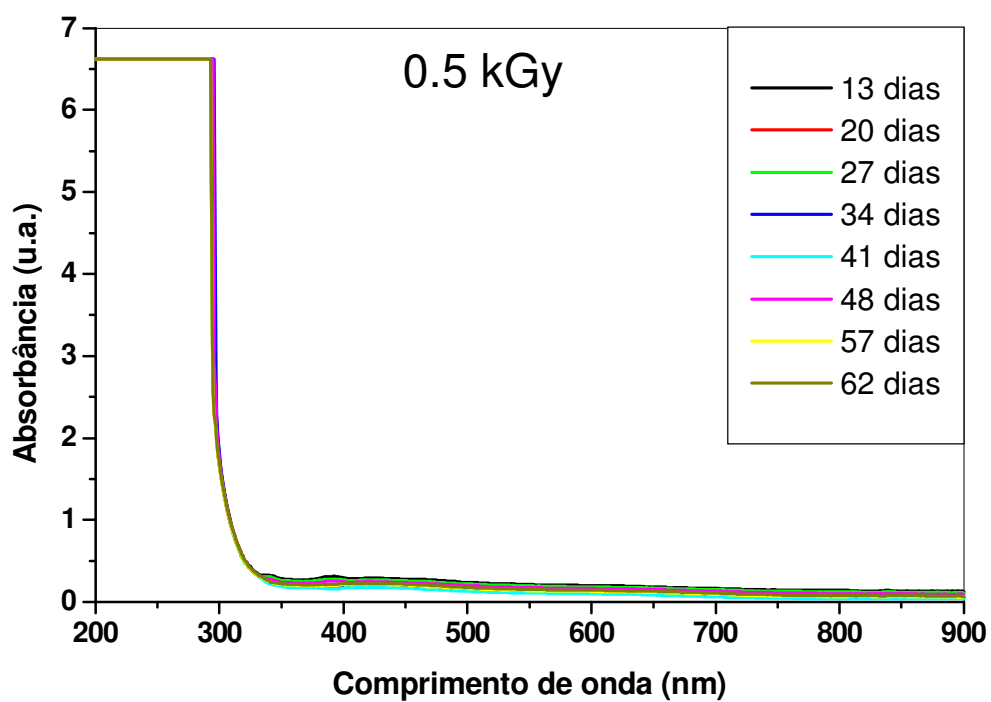
YANAGUIZAWA, J. A., SHINOHARA, A. H., SILVA, R. J. F., MAGALHÃES, O. H., SANTANA, D. M. F., OSSANAI, L. Radiografia Digital Industrial em Compósito Polimérico Avançado de Pás Eólicas In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 9., 2007, Salvador. **Anais...** São Paulo: Monferrer Produções LTDA, 2007. 1 CD-ROM.

YOSHIMURA, E. M.; OKUNO, E.; SUSZYNSKA, M. Gamma irradiated soda lime silicate glasses of different origin: isothermal light emission. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 191, p. 375-378, 2002.

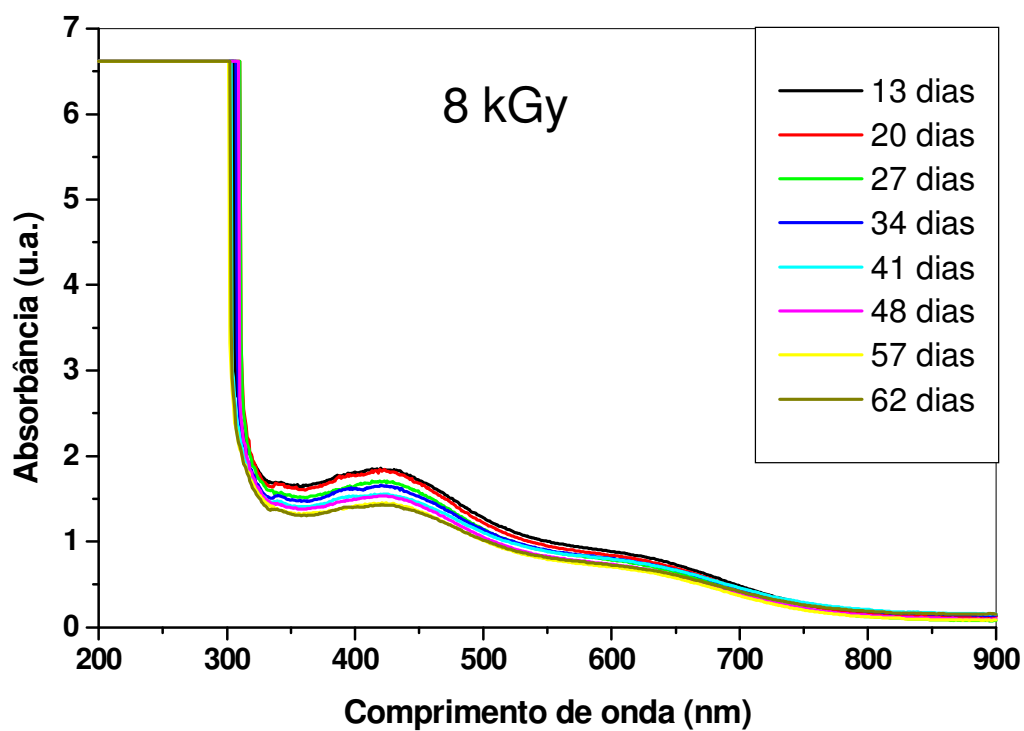
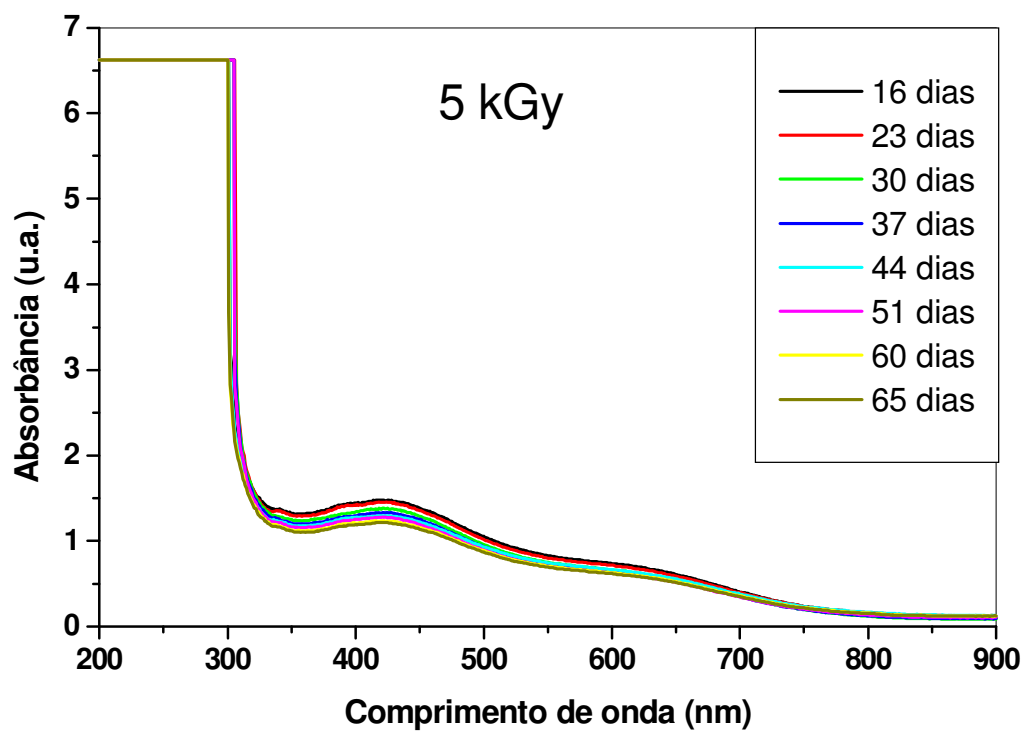
ZHENG, Z.; HONGGUI, D.; DAOCHUAN, Y.; JIE, F. Window glass as a routine dosimeter for radiation processing. **Radiation Physics and Chemistry**, Jiangsu, v.31, n. 4-6, p. 419-423, 1988.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Espectros de absorbância no UV-Vis de vidro soda-cal sílica ao longo do tempo de fading (0,5 kGy e 3 kGy).

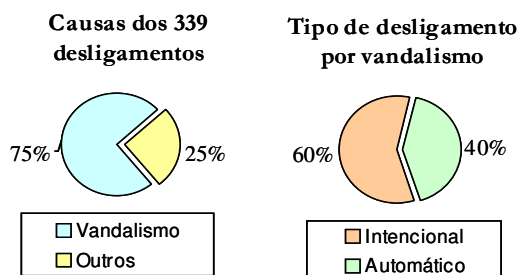


APÊNDICE B – Transmitância no UV-Vis de vidro soda-cal ao longo do tempo de fading (5 kGy e 8 kGy).



ANEXOS

ANEXO A - Estatística sobre vandalismo nas linhas de transmissão da CHESF, entre os anos de 1988 e 2001. Reportagem sobre vandalismo nas linhas de transmissão da CHESF.



(COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO, 2001).

Vandalismo causou apagão no Nordeste

Isoladores que ficam à beira das estradas servem para prática de tiro ao alvo

RECIFE. O apagão ocorrido no Nordeste na última quarta-feira foi provocado pelo rompimento de uma cadeia de isoladores, durante serviço de manutenção. Foi um acidente de grande porte, o primeiro do gênero na região, quando uma linha de transmissão sofreu um curto-circuito, uma segunda linha caiu devido ao problema na primeira e a terceira estava desligada para a inspeção de um transformador. Segundo a Chesf, os isoladores que seriam trocados foram danificados por vândalos.

Anualmente, a empresa é obrigada a trocar milhares de isoladores danificados por marginais. O presidente da Chesf, Mozart Siqueira Campos, admitiu ontem que, pela dimensão do acidente, a recuperação foi rápida, já que a falta de energia variou entre cinco e 55 minutos, dependendo da localização da cidade.

A maioria dos isoladores prejudicados fica à margem das estradas. Segundo a Chesf, eles chegam a servir de alvo para tiros, embora estejam a 20 ou 30 metros do solo. Como são de vidro, são facilmente destruídos. Desde 1998 os isoladores antigos vêm sendo substituídos por outros, com material plástico mais resistente. — Há um sistema permanente de inspeção por helicóptero nos 18 mil quilômetros de linhas de transmissão e, quando um isolador está quebrado, enviamos imediatamente a equipe de manutenção. No processo de manutenção, a cadeia se quebrou e o fio preso à cadeia deslocou-se para junto da torre — explicou Mozart.

Indústria e comércio não relataram prejuízos

O executivo disse que, para o tamanho do problema, a recuperação foi rápida: — Mobilizamos 250 homens e o padrão de restabelecimento não faria vergonha em nenhuma parte do mundo para o grau do acidente — disse.

Em Pernambuco, 50% dos 184 municípios foram atingidos, assim como 30% dos municípios de Ceará, Paraíba, Rio Grande do Norte e Alagoas. O curto-circuito ocorreu na linha que sai de Paulo Afonso (Bahia), passa por Angelim (em Pernambuco) e vai até Jaboatão dos Guararapes, a 20 quilômetros de Recife.

A Federação de Indústrias de Pernambuco (Fiepe) não tinha ontem nenhum levantamento dos eventuais prejuízos provocados pela falta de energia. O presidente da Câmara de Diretores Lojistas, Fernando Catão, também não recebeu reclamação formal do setor: — Felizmente o apagão foi pela manhã. Teria sido bem pior se tivesse ocorrido no fim da tarde. O presidente do Sindicato da Indústria de Panificação, Berivaldo Loreto, também não relatou nenhum prejuízo devido ao apagão — Não recebemos nenhuma queixa até agora.

Fonte: Hemeroteca do Instituto de Eletrotécnica e Energia, nº: 65836. O Globo, data: 12/10/2002. (Disponível em: <<http://infoener.iee.usp.br/infoener/hemeroteca/imagens/65836.htm>>. Acesso em 08 jan. 2008.)

ANEXO B - Reportagem sobre vandalismo em Picos-PI.

Picos(PI), terça-feira, 8-Jan-2008		PÁGINA INICIAL ADICIONAR AOS FAVORITOS FALE CONOSCO BUSCA	
CANAIS Álbum de Fotos Mural de Mensagens Colírio Cidade Cultura Educação Entrevistas Esporte Economia Geral Municípios Notícias de Bocaina Notícias de Santana Polícia Piauí Pop Política Fale Conosco Saúde COLUNAS Direito & Cidadania Piauí In Sampa Amar Bem Farol Foca Talvez eu Diga Direito e Advocacia Notícias em Bloco UTILIDADES 102 On-line Busca de CEP Downloads Webmail PARCEIROS Acesse Piauí Notícias de Floriano Monsenhor Hipólito Prefeitura de Picos Acesso 343 Simões Neto	FALE CONOSCO LISTA DE NOTÍCIAS		NOTÍCIAS
	Consulta CPF/CNPJ Online Pendências e Restrições financeiras Protestos e Cheques sem fundo		Baixar Toques Grátis Baixar Toques para Celular. Veja Como! Dada.net/Toques Anúncios Google
	::EM PRIMEIRA MÃO Ato de vandalismo deixa Picos sem energia elétrica por quase 5 horas Publicado em 02.09.2005 - 17:49:40		
	Aparelhos teriam sido quebrados com pedras. Por: Jailson Dias		
	Segundo informações oficiais da diretoria da Cepisa (Companhia Energética do Piauí) de Picos, um ato de vandalismo teria sido o responsável pela falta de energia elétrica na cidade ocorrida nessa sexta-feira (02), que teve início às 11h40min e se estendeu até às 16h15min.		
	De acordo com a diretoria da empresa, os aparelhos chamados "isoladores", constituídos de vidro, que distribuem a energia para a cidade, estavam localizados nas proximidades do bairro Pedrinhas, no trecho entre as subestações da Chesf (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) no Bairro Samambaia e a subestação da Cepisa no Bairro Aerolândia.		
	Os 5 isoladores de vidro teriam sido destruídos por pessoas não identificadas, que podem ter atirado pedras utilizando "baladeiras ou estilingues", tendo em vista a altura onde os aparelhos se encontravam.		
	A demora na reposição dos isoladores foi ocasionada, segundo fontes na Cepisa, pelo difícil acesso do local onde os mesmos se encontravam, o qual não permitia o uso de veículos motorizados.		
	A falta de energia causou transtornos em todo o centro de Picos, destacando-se o cancelamento da 18ª sessão ordinária na Câmara Municipal e o adiamento do II Encontro de Varejistas do Estado do Piauí, que estava previsto para acontecer a partir das 2:00 h da tarde no auditório da ACINP (Associação Comercial e Industrial da Grande Região de Picos) e foi transferido para o Picos Hotel com início às 16h30min.		
	Além disso, houve transtornos nas Casas Lotéricas, Agências Bancárias e vários estabelecimentos comerciais do município.		

(RIACHONET. Disponível em: <<http://www.riachaonet.com.br/materia.php?id=585>>. Acesso em 08 jan. 2008.)

ANEXO C - Reportagem sobre vandalismo no sudoeste e sul do Pará.

(Tucuruí-Altamira, da Eletronorte) Doze municípios ficam sem energia elétrica

Diário do Pará
23/02/2007

APAGÃO

Um desligamento da linha de transmissão de 230 kV Tucuruí-Altamira, da Eletronorte, ocorrido às 2h46 da madrugada de ontem, interrompeu durante 10 horas a transmissão de energia para as subestações da Celpa, que atendem a doze municípios do sudoeste do Pará.

A energia só foi plenamente reestabelecida às 12h40 de ontem. O motivo da pane foi a quebra de duas cadeias de isoladores da linha motivada por atos de vandalismo da população da área.

O desligamento interrompeu a transmissão de energia para as subestações da Celpa que atendem aos municípios de Itaituba, Rurópolis, Trairão, Altamira, Brasil Novo, Anapu, Senador José Porfírio, Vitória do Xingu, Medicilândia, Ururuá, Placas e parte de Santarém. Aproximadamente 60 mil domicílios ficaram sem energia durante a manhã.

Durante a manhã, técnicos da Eletronorte percorreram os trechos da linha Tucuruí-Altamira por terra e também por ar, com a ajuda de um helicóptero, para detectar as causas do desligamento. A condição climática da região que apresentava fortes chuvas também dificultou muito o acesso dos técnicos ao local, atrasando a resolução do problema, tanto que o helicóptero teve que descer três vezes ao local.

Airton Hass Jr., gerente da regional de transmissão da Eletronorte no Pará, informou que o linhão possui três fases. Numa das fases - a "V" - existiam 16 isoladores de vidro, que separam o cabo de força da estrutura metálica. "Dessas 16 fases, 11 estavam estilhaçadas por ação humana, muito provavelmente por tiros de arma de fogo. Com isso, o isolamento do circuito foi fragilizado, entrou em curto e impediu a passagem de energia", explicou o gerente.

Os técnicos da Eletronorte verificaram, ainda, que na fase "B", oito isoladores estavam danificados e na fase "A", outros cinco. "Aproveitamos para fazer uma manutenção geral nessas duas fases para evitar problemas futuros", disse Airton.

Ele informa que na área onde ocorreu o problema - perto do município de Pacajá - existem muitas invasões de onde provavelmente devem ter vindo as pessoas que cometeram os atos de vandalismo. "Já fizemos ocorrência policial na comarca de Pacajá e denunciamos o fato à Polícia Federal para investigação dos fatos", revela o dirigente da Eletronorte.

Luiz Flávio

O fornecimento foi restabelecido nos municípios de Altamira, Brasil Novo, Anapu, Senador José Porfírio, Vitória do Xingu, Medicilândia, Ururuá e Placas às 12h42. Em seguida, foi a vez dos municípios de Itaituba, Rurópolis e Trairão serem normalizados às 12h44. As áreas do município de Santarém que estavam parcialmente interrompidas, também em consequência do problema na Linha de Transmissão, foram normalizadas às 13h09.

(CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE, 2007)

Vandalismo deixa cidade do sul do Pará sem energia elétrica

O município de São Félix do Xingu, no Sul do Pará ficou sem energia elétrica por aproximadamente seis horas na noite da última segunda-feira (16). A causa da interrupção aponta para indícios de vandalismo na cadeia de isoladores da Linha de Transmissão (LT) Tucumã/São Félix. Esta foi a segunda ocorrência neste início de semana. O caso está sendo investigado pela delegacia daquela cidade, onde a Celpa registrou a ocorrência.

Uma cadeia de isoladores de vidro foi destruída com a ação inconseqüente, fazendo com que a proteção automática da LT atuasse, interrompendo o suprimento de energia para a subestação que abastece a cidade com cerca de seis mil unidades consumidoras.

O desligamento de ontem (16/04) foi registrado às 18h42 e o restabelecimento do sistema ocorreu à 1 hora da madrugada desta terça-feira, 17, após a substituição dos equipamentos danificados. No sábado 14, data da primeira ocorrência, a linha de transmissão desligou às 23h16 e o fornecimento foi normalizado às oito horas da manhã de domingo, 15.

A polícia está investigando os possíveis causadores que estariam depredando o patrimônio público em prejuízo a usuários desse tão importante serviço de utilidade pública que é a energia elétrica. Essas ações reprováveis podem trazer consequências ainda maiores, quando ocorrem no interior do Estado, onde muitas unidades de saúde e até hospitais, não possuem geradores de energia, dependendo exclusivamente da continuidade do fornecimento de energia elétrica.

(Disponível em: <<http://www.diariodopara.com.br/Edicoes/2007/05/16/Index.asp>> Acesso em 16mai. 2007.)