

## ESTUDO DO EFEITO DA DELAMINAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM VIDRO COM RESISTÊNCIA BALÍSTICA

C.G. BASTOS ANDRADE<sup>1</sup>; A.H. MUNHOZ JR<sup>1</sup>; L.G. ANDRADE E SILVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

<sup>2</sup>INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGETICAS E NUCLEARES

[c.gba@terra.com.br](mailto:c.gba@terra.com.br)

### RESUMO

*O vidro com resistência balística é composto por camadas de vidro, policarbonato ou similares, poliuretano e polivinilbutiral ou uma resina que através de um processo de autoclavagem une os materiais obtendo as propriedades desejadas. As espessuras bem como a quantidade de lâminas variam de acordo com o nível de resistência balística que se deseja alcançar. Cada fabricante possui sua própria composição. O exército brasileiro é o responsável pela certificação dos vidros. A delaminação ocorre com o envelhecimento do vidro com resistência balística. O conhecimento da alteração das propriedades mecânicas devido a delaminação do vidro é um importante dado devido a utilização dos mesmos. Compararam-se os dados de amostras de vidro delaminado com amostras de vidro não delaminados. Os ensaios foram a tensão de ruptura a flexão em três pontos, dureza Shore-D e o ensaio balístico em túnel de prova segundo a norma de balística NBR 15000. O vidro foi caracterizado por espectrofotometria de absorção atômica.*

*Palavras chave: blindagem transparente, vidro com resistência balística, resistência ao impacto balístico, tensão de ruptura à flexão.*

### 1 INTRODUÇÃO

A crescente presença das Forças Armadas Brasileiras em operações de Paz, o trabalho das Polícias no enfrentamento ao narcotráfico, e uma parcela da sociedade civil que vive cercada de precauções alarmada com a crescente criminalidade são situações que têm em comum o emprego blindagem de

veículos e arquitetura (guaritas blindadas, salas seguras, janelas com resistência balística e portas blindadas, dentre outras).

Os testes realizados para aprovar ou não um vidro com proteção balística são realizados segundo normas específicas, no Brasil a NBR 15000 é a norma utilizada.

Um dos fatores determinantes no sucesso de operações que exigem o emprego de veículos blindados é justamente o peso das blindagens. Blindagens mais espessas possuem um maior peso, diminuindo a eficácia dos veículos no quesito mobilidade. Laboratórios de pesquisa militar tem desenvolvido programas com o objetivo de identificar novos materiais transparentes mais leves e mais resistentes que os atualmente empregados na proteção balística. A contínua pesquisa para manutenção e melhora da acuidade visual em proteções transparentes tem sido motivo de pesquisas (KELLY, 2001).

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico e balístico de um vidro com resistência balística nível III, composto por 04 (quatro) lâminas de vidro plano transparente (soda-cal), denominado comercialmente de vidro cristal incolor, de 8mm de espessura, película de poli(vinil butiral), 04 (quatro) chapas de poliuretano e 01 (uma) chapa de policarbonato, perfazendo uma espessura total de 42mm. Os raios gama foram utilizados para produzir uma modificação rápida nas propriedades estruturais do conjunto e, dessa maneira nas suas propriedades mecânicas e balística.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste trabalho foi estudado um vidro balístico nível III fabricado pela indústria Centigon, unidade Brasil, situada em Barueri-SP. O material recebido foi dividido em 3 (três) grupos, sendo “in-natura”, “130” e “340”. As doses de radiação gama utilizadas foram: 130 kGy e 340 kGy para as amostras de vidro com proteção balística. A irradiação por raios gama foi realizada ao ar, em um irradiador multipropósito semi-industrial com fonte de cobalto 60, com uma taxa de dose média de 5 kGy/h. à temperatura ambiente. Tais doses de radiação foram selecionadas uma vez que se observa uma redução na dureza do PC da ordem de aproximadamente 50 % ao ser submetido à radiação gama em doses superiores a 200kGy (SEGUCHI, 2002). Os ensaios utilizados

foram a tensão de ruptura à flexão segundo a norma ASTM D-790, espectrometria de absorção atômica, compressão e dureza. No ensaio balístico foi utilizada munição 7,62x51mm com velocidade média de  $864 \pm 15$  m/s, realizada em túnel balístico, segundo norma NBR 15000.

A caracterização dos vidros com resistência balística do nível III foi realizada por meio de ensaio para determinar a composição química, ensaio mecânico, balístico e microscopia óptica.

### **2.1 Caracterização das Amostras Obtidas**

A caracterização das amostras não irradiadas foi realizada por espectrometria de absorção atômica para análise do vidro, dureza para análise do policarbonato e ensaios de resistência à flexão, balístico e microscopia óptica para análise do conjunto. As amostras irradiadas foram caracterizadas por meio dos ensaios de dureza para análise do policarbonato e ensaios de resistência à flexão, balístico e microscopia óptica para análise do conjunto.

#### **2.1.1 Ensaio de espectrometria de absorção atômica**

O ensaio de espectrometria de absorção atômica com chama foi realizado em equipamento de AAS marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst 200, no laboratório de Engenharia de Materiais da UPM, em São Paulo, SP. A quantidade de sílica foi obtida utilizando 1g de amostra através do processo de gravimetria com o emprego do ácido sulfúrico concentrado seguido pela adição de 5 ml de ácido fluorídrico. O resíduo que permaneceu no cadinho foi dissolvido utilizando-se ácido clorídrico concentrado e colocado em um balão volumétrico de 100 ml para determinação da composição do restante, alumínio, sódio, cálcio, magnésio, potássio e ferro por espectrometria de absorção atômica (AAS).

#### **2.1.2 Ensaio de Dureza Shore-D**

O ensaio de dureza Shore-D foi realizado com um durômetro modelo Hardmatic, marca Mitutoyo. O ensaio foi realizado no laboratório de Engenharia de Materiais da UPM, em São Paulo, SP, a uma temperatura de 21°C, seguindo a norma ASTM D2240. Foram selecionados 3 (três) amostras do laminado de cada grupo, “in-natura”, “130” e “340”, sendo 15 (quinze) as impressões realizadas na face anti-estilhaço onde o policarbonato está presente.

### **2.1.3 Ensaio de Resistência à Flexão**

O ensaio de resistência a flexão em 3 pontos do laminado foi realizado em máquina de ensaios universal marca MTS, modelo QTest, no laboratório de Engenharia de Materiais da UPM, em São Paulo, SP, à uma temperatura de 21°C, seguindo os quesitos da norma ASTM D-790. Foram obtidos os resultados de limite de resistência à flexão, de resistência de curvatura e a deformação até a carga máxima.

### **2.1.4 Ensaio Balístico**

O ensaio balístico do laminado foi realizado de acordo com a norma NBR 15000 ( ABNT, 2005 ), em um túnel balístico. A munição utilizada foi a 7,62x51mm, com massa de  $9,8 \pm 1$ g. Os disparos foram realizados por meio de um provete fixo em uma base inercial utilizando os parâmetros de distância, 5m medidos da boca do provete até a amostra e um ângulo de incidência de 0°. A amostra foi fixada em dispositivo de aço fechado, preso com grampos de aço ao suporte do alvo. A velocidade média dos projéteis foi medida pela interferência no feixe de luz emitido pelas duas barreiras ópticas, interrompidas com a passagem do projétil. Um cronógrafo acoplado a estas barreiras ópticas mede o tempo gasto na passagem do projétil entre as mesmas. A energia de impacto do projétil na amostra é considerada igual à energia cinética do mesmo, calculada considerando-se a velocidade média e a massa do projétil. O dano causado por cada projétil foi avaliado em função do aspecto da fratura, assim como, quanto à resistência balística pretendida pelo nível da amostra.

O desempenho balístico das amostras do laminado em estudo foi avaliado considerando os danos produzidos pelo projétil no vidro com proteção balística. A temperatura aferida na sala de testes foi aferida em 27°C e 70% de umidade relativa. A velocidade média dos disparos foi de 864m/s e 9,8g a massa nominal dos projéteis utilizados. Desse modo, ao utilizar a equação 1 representada abaixo, obteve-se a energia cinética média de 3.655,717J, atingindo o objetivo proposto.

Calculou-se a energia cinética ( $E_c$ ) pela equação 1:

$$E_c = ( m.v^2 ) / 2 \text{ (equação 1)}$$

Em que:

$E_c$  = energia cinética ( J )

m = massa (kg)

$v$  = velocidade (m/s)

### **2.1.5 Microscopia Óptica**

A análise por microscopia óptica foi realizada em um equipamento marca Olympus, modelo BX60, no Laboratório de Metalografia da UPM, em São Paulo/SP. Foram analisadas as superfícies de fratura dos corpos de prova submetidos aos ensaios de Flexão 3 pontos.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O vidro com proteção balística em estudo, após ser irradiado, apresentou coloração escura.

### **3.1.1 Ensaio de Espectrometria de Absorção Atômica**

Como resultado do ensaio de espectrometria de absorção atômica realizado foram obtidas as seguintes composições apresentadas na Tabela 01.

Tabela 01 - Composição química do vidro utilizado no laminado.

Óxidos	% em massa
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ALD*
CaO	8,340
MgO	3,000
Na <sub>2</sub> O	10,220
SiO <sub>2</sub>	70,930
K <sub>2</sub> O	0,540
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,016

\*ALD = Abaixo do limite de detecção

Ao comparar os resultados obtidos neste ensaio com valores encontrados na literatura, observou-se que a amostra estudada apresentou valores muito próximos dos dados da literatura (CALLISTER, 2006).

### **3.1.2 Ensaio de Dureza Shore-D**

Amostra	Tabela 02 – Dureza Shore-D		
	“in-natura”	“130”	“340”
1	92,667	93,300	93,667
2	92,689	93,278	93,691
3	92,707	93,316	93,659
Média Aritmética	92,688	93,298	93,672
Desvio Padrão	0,020	0,019	0,017

Como resultado do ensaio de dureza Shore-D, foram obtidos os valores apresentadas na Tabela 02 e no Gráfico 01.

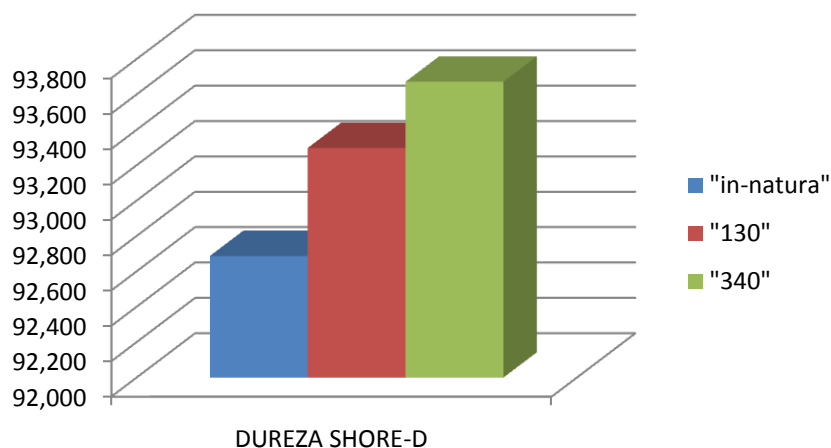


Gráfico 01 – Comparativo da Dureza Shore-D entre os três grupos do laminado.

### **3.1.3 Ensaio de Resistência à Flexão**

Neste ensaio foram obtidas as seguintes propriedades: resistência de curvatura, deformação até a carga máxima e limite de resistência à flexão. Os resultados foram organizados utilizando o critério dos grupos, sem irradiação e irradiados, 130 e 340kGy. Com base nos dados obtidos, foi gerada a Tabela 03 onde são apresentados os dados resultantes da média aritmética da resistência de curvatura, deformação até a carga máxima e momento de ruptura para os três grupos do laminado em estudo.

Tabela 03 – Dados com a média aritmética dos ensaios de flexão do laminado

Amostra ( grupos )	Resistência de Curvatura ( MPa )	Deformação até a Carga Máxima ( mm )	Momento de Ruptura ( N )
in natura	8,4	1,71	222,74
130	8,3	1,68	222,08
340	7,3	1,74	192,22

Observou-se que o grupo “in-natura”, sem irradiação, forneceu valores de resistência de curvatura, e momento de ruptura, superiores aos obtidos nos ensaios dos grupos que receberam doses de radiação, o grupo “130” e o grupo “340”. A análise dos resultados mostra que o material do grupo “130” e “340”, isto é, os grupos que receberam radiação, sofreram alterações em sua estrutura. Foi observada também, uma maior quantidade de material cerâmico fragmentado desprendido durante o ensaio de ruptura a flexão resultante das fraturas nas amostras do grupo “340”, o que fortalece a tese de maior degradação do material polimérico em virtude de uma maior exposição aos raios gama.

### **3.1.4 Ensaio Balístico**

A análise realizada considerou a resistência a penetração e/ou a perfuração da amostra do laminado em função do impacto aceitável de um determinado projétil. Segundo a norma NBR 15000, são considerados aceitáveis os impactos quando: (a) o ângulo de incidência não superior a 5°, negativo ou positivo, do ângulo de impacto pretendido, (b) a velocidade do projétil respeita os limites de tolerância; (c) o impacto incida pelo menos a 50 mm das arestas da amostra e/ou de um outro impacto. Na Tabela 4 são apresentadas as médias das velocidades dos disparos e da energia cinética calculada pela equação 1.

Tabela 4 – Comparativo do resultado do ensaio balístico das amostras.

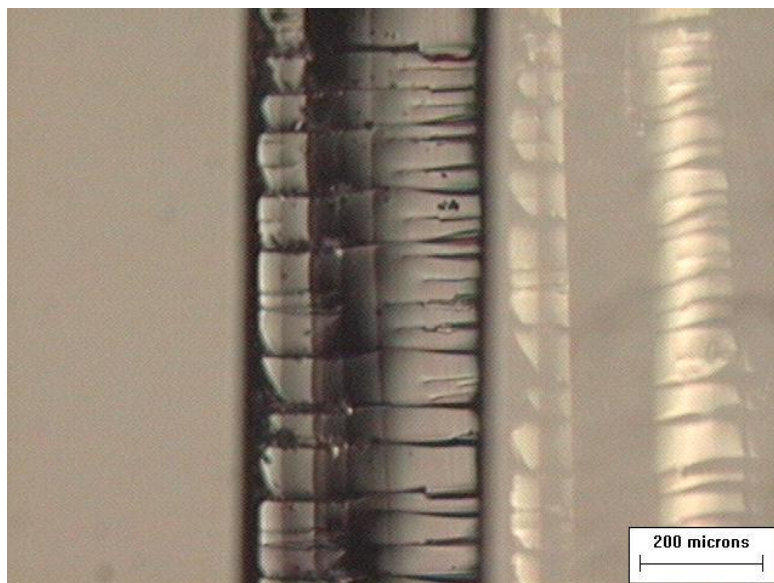
Amostras	Velocidade ( m/s )	Energia Cinética ( J )
“in-natura”	871	3.722,017
“130”	860	3.622,487
“340”	863	3.648,236

As amostras, irradiadas e sem irradiação, apresentaram comportamento balístico conforme o esperado, sendo que a amostra que recebeu uma dose de 130kGy apresentou uma maior deformação da camada anti-estilhaço, isto é, a última camada do laminado, que é composta por material polimérico, resistindo aos 5 (cinco) disparos. A amostra irradiada a 340kGy não resistiu aos disparos sendo transpassada pelo projétil.

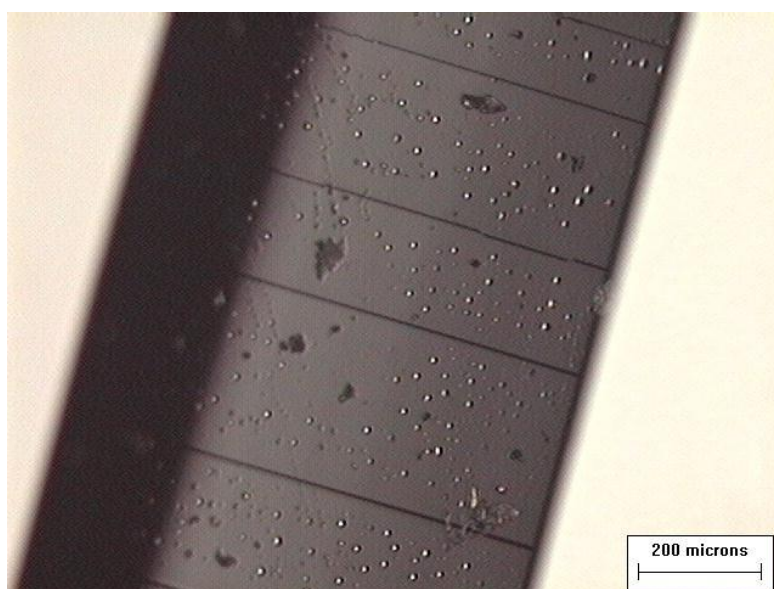
### **3.1.5 Microscopia Óptica**

Através do exame visual das amostras dos 3 (três) grupos foi observado que as fraturas possuem um aspecto bastante similar em todos os grupos. Conforme foi aumentada a dose de radiação, observou-se o aumento de material cerâmico, vidro, que se desprende do laminado no ensaio de tensão de ruptura a flexão.

Nas Fotografias 1 e 2 são mostradas as amostras não irradiada e irradiada a 340kGy. Observa-se que na Fotografia 2 há uma grande quantidade de bolhas que foram geradas após a irradiação do material.



Fotografia 01 - Imagem obtida por M.O. da trinca na amostra não irradiada.  
(Acervo do Autor, 2010)



Fotografia 02 - Imagem obtida por M.O. da trinca na amostra "340" irradiada  
(Acervo do Autor, 2010).

#### 4 CONCLUSÃO

Após a realização e análise de todos os ensaios, seguindo os critérios das normas utilizadas neste trabalho, pode-se concluir que para as amostras estudadas a radiação gama possui um efeito deletério nas propriedades mecânicas do vidro com proteção balística. Os dados de dureza mostram que o policarbonato do laminado irradiado a 130 e 340kGy possui uma dureza maior



quando comparado ao policarbonato do laminado sem irradiação. O ensaio balístico mostra que o policarbonato apresentou uma fratura mais acentuada nas placas irradiadas a 340kGy e o vidro destacou-se do conjunto em maior quantidade. Os dados obtidos nos ensaios de tensão de ruptura à flexão em 3 pontos e a imagem de microscopia óptica mostram que as amostras não irradiadas apresentam maior resistência de curvatura. As amostras irradiadas apresentam maior desprendimento de pedaços de vidro na fratura e a presença de bolhas nas peças analisadas. Doses de radiação gama até 130kGy não comprometem de forma expressiva o comportamento das amostras do vidro com resistência balística estudadas no ensaio de resistência balística. Altas doses de radiação gama comprometem as propriedades mecânicas das amostras estudadas e no caso do quesito resistência balística, o resultado obtido reprova a amostra “340” por ocorrer a transfixação total do projétil.

## **5 REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma NBR 15000 : Blindagens para impactos balísticos – Classificação e critérios de avaliação*, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

CALLISTER W. D. Jr. *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro, Ed. LTC S.A., p. 1 - 589, 2006.

KELLY, P. M. Lightweight transparent armour systems for combat eyewear, *19<sup>th</sup> International Symposium of Ballistics*, p. 969-975, 2001.

SEGUCHI, T.; YAGI, T.; ISHIKAWA, S.; SANO, Y. *New material synthesis by radiation processing at high temperature – polymer modification with improved irradiation technology*, *Radiation Physics and Chemistry*, v. 63, p. 35-40, 2002.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Universidade Presbiteriana Mackenzie e ao MACK PESQUISA pelo auxílio recebido.

## STUDY OF EFFECT OF DELAMINATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF A GLASS WITH BALLISTIC RESISTANCE

### ABSTRACT

The ballistic-resistant glass is composed of layers of glass, polycarbonate or the like, or a polyurethane and polyvinyl resin obtained through an autoclaving process. The thickness and the quantity of blades vary with the level of ballistic resistance to be attained. Each manufacturer has its own composition. The Brazilian Army is responsible for certification of this glasses. The delamination occurs with aging of the glass with ballistic resistance. Knowledge of the change in mechanical properties due to delamination of the glass is an important data of them. We compare the data of samples irradiated with glass samples not irradiated. The tests were the 3 point bending test, hardness, optical microscopy, and ballistic tunnel test according to standard ballistic NBR 15000. The glass was characterized by atomic absorption spectrophotometry.

**Key Words:** transparent armor, glass with ballistic resistance, ballistic impact resistance, tensile strength.