

DESENVOLVIMENTO DE PROTEÇÕES BALÍSTICAS COMPOSTAS POR RESINA EPÓXI REFORÇADA POR FIBRA DE VIDRO E PLACAS DE ALUMINA

Leonardo Ajdelsztajn

Fernando Luiz Bastian

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Lab. de Materiais Compósitos
COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Cx. P. 68505, CEP.: 21945-970, Rio de Janeiro - RJ

Resumo. *É apresentado um estudo experimental do comportamento de blindagens compósitas sob impacto balístico. Para isso foram fabricados vários tipos de placas compósitas objetivando a otimização em relação ao dano causado pelo impacto. As placas consistem de laminados poliméricos reforçados por fibras de Vidro com pequenas placas cerâmicas de Alumina na frente dos mesmos. Foram estudadas algumas variáveis do laminado como: a composição da resina, a relação fibra/matriz, e camadas com diferentes valores de rigidez da resina. A performance das blindagens foi avaliada através de ensaios balísticos utilizando a munição 7.62 x 51 mm (308 Winchester). Foi empregada a técnicas de Transparência à Luz com o objetivo de quantificar o dano causado pelo impacto. Os resultados obtidos foram relacionados com as variáveis testadas.*

Palavras-chave: *Blindagens Compósitas, Impacto Balístico, Placas Compósitas.*

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho, buscamos desenvolver conhecimento na área de blindagens compósitas. Trabalhamos com fibras de vidro, um tipo de resina e um tipo de material cerâmico. Ao fixar o tipo de material cerâmico modificamos algumas variáveis na placa polimérica reforçada com fibras e estudamos a influência destas modificações no comportamento da placa polimérica frente ao impacto balístico de um calibre, especificado mais adiante. Resistir a este calibre é requisito mínimo para blindagens de veículos de transporte de valores no Brasil. Um outro aspecto considerado neste trabalho é a fabricação de blindagens com materiais de menor custo possível.

2. MATERIAIS UTILIZADOS

Com o objetivo de fabricar e testar placas compósitas para aplicações sob impacto balístico, utilizamos materiais como: um sistema de resina Epóxi (matriz polimérica), fibras de vidro e de aramida em forma de tecido (reforço) e um material cerâmico em forma de pequenas placas (proteção do laminado contra a penetração de projéteis).

2.1. Sistema Epóxi

Dentre as matrizes termofixas disponíveis comercialmente, a matriz Epóxi foi escolhida pelo seu bom desempenho sob impacto e particularmente sob impacto balístico como sugerido por Ferreira (1994).

O sistema epóxi empregado neste trabalho é formado pela resina Epóxi DER 331 e pelo endurecedor ou agente de cura DEH 24 fabricados pela Dow Química S.A.. A resina DER 331 é uma resina bifuncional, líquida à temperatura ambiente e com estrutura básica (95%) de diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA). As propriedades da resina DER 331 estão resumidas na Tabela 1. O endurecedor DEH 24 é um líquido composto basicamente pela amina alifática hexafuncional trietileno tetramina (TETA) e suas propriedades estão resumidas na Tabela 2. Os dados das tabelas 1 e 2 foram fornecidos pela Dow Química S.A (1996).

Tabela 1. Propriedades da Resina DER 331.

| Resina DER 331 | |
|--------------------------------------|---------------|
| Peso equivalente em epóxi | 182-192 |
| Viscosidade, mPa·s, 25° C | 11000 – 14000 |
| Densidade, g/cm ³ , 25° C | 1,160 |

Tabela 2. Propriedades do Endurecedor DEH 24.

| Endurecedor DEH 24 | |
|--|-----------|
| Peso equivalente em hidrogênios livres | 24,4 |
| Viscosidade, mPa·s, 25° C | 19,5-22,5 |
| Densidade, g/cm ³ , 25° C | 0,97-0,98 |

Este sistema é de cura à frio e de reação exotérmica, sendo normalmente empregado em compósitos reforçados por fibras fabricados por laminação manual que se adequa aos métodos de fabricação empregados neste trabalho.

Segundo d'Almeida (1994) para a formulação, empregando a razão resina/endurecedor próxima da estequiométrica, o tempo de gel varia entre 25-35 minutos. A cura total do sistema ocorre após pelo menos 7 dias à temperatura ambiente ou após 1-2 horas a 100° C.

Além do endurecedor, pode-se adicionar algum tipo de agente que introduza alguma diferença no comportamento mecânico do laminado a fim de melhorar seu desempenho balístico, como, por exemplo, um flexibilizador da matriz Epóxi. Neste trabalho adicionamos em alguns corpos de prova um agente conhecido comercialmente com DER 732 (código da Dow Química) que confere à matriz maior flexibilidade e, por conseguinte, maior absorção de energia sob a forma de deformação elástica.

Este agente flexibilizador é um tipo de resina Epóxi que se origina de uma reação entre poliglicol e epicloriglicina. Segundo o fabricante (Dow Química, 1996), um sistema típico de resina Epóxi (Bisfenol A/ Epicloriglicina como a resina DER 331) deverá ser flexibilizado substituindo de 5-30% da resina Bis-Epi pela resina DER 732. As propriedades da resina DER 732 encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades da resina Epóxi flexível DER 732.

| Resina Epóxi Flexível DER 732 | |
|--------------------------------------|---------|
| Peso equivalente em Epóxi | 305-335 |
| Viscosidade, mPa·s, 25° C | 55-100 |
| Densidade, g/cm ³ , 25° C | 0,106 |

2.2 Fibra de vidro

O tecido de fibra de vidro adotado foi do tipo E com gramatura de 180g/m², fabricado pela Owens-Corning Fiberglass. Este tipo de fibra, como visto anteriormente, foi projetado para aplicações elétricas, no entanto seu desempenho como fibra estrutural é satisfatório para certas aplicações. É um material de baixo custo e de fácil aquisição. Algumas propriedades da fibra de vidro tipo E estão resumidas na Tabela 4 (Ferreira, 1994).

Tabela 4. Propriedades da Fibra de Vidro Tipo-E.

| Fibra de Vidro Tipo-E | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------------|
| ρ (g/cm ³) | Coef. De Poisson | Resistência à Tração (GPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Diâmetro Típico (μ m) | Coefficiente de Expansão Térmica (K ⁻¹) | Deformação até a Ruptura (%) |
| 2.54 | 0.2 | 3.45 | 72.4 | 10 | 4.7×10^{-6} | 4.8 |

2.3. Material Cerâmico

Para fornecer ao laminado uma proteção efetiva contra a penetração dos projéteis, utilizamos placas cerâmicas à base de Alumina nas dimensões indicadas na Figura 1. Este material cerâmico é utilizado comercialmente em raspadores industriais.

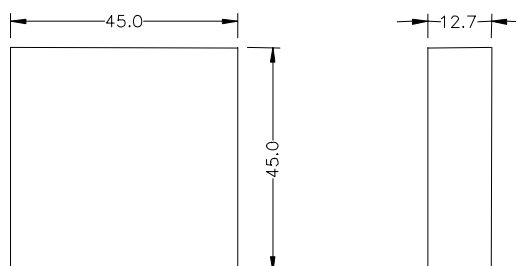


Figura 1. Placa Cerâmica (cotas em milímetros).

As propriedades do material cerâmico, fornecidos pelo fabricante (NGK do Brasil, 1996), podem ser vistas na Tabela 5:

Tabela 5: Propriedades fornecidas pelo fabricante da placa de Alumina.

| % de Al ₂ O ₃ | Dureza (HC) | Resistência à Flexão (MPa) | Resistência à Compressão (MPa) | Densidade (g/cm ³) |
|-------------------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 87 | 90 | 250 | 1000 | 3.54 |

Para melhor caracterizar o material cerâmico, optamos por determinar suas propriedades mecânicas através do ensaio não destrutivo de ultra-som. Para determinar tais propriedades, Módulo de elasticidade, Coeficiente de Poisson e Módulo de Cisalhamento, determinamos a velocidade de propagação de ondas longitudinais e transversais na cerâmica, utilizando dois transdutores com frequência de 4MHz, um que emite ondas longitudinais e outro transversais (Vary, 1991).

As propriedades mecânicas obtidas pelo método de ultra-som estão relacionadas abaixo:

| | |
|------------------------|--------------------------|
| Coeficiente de Poisson | $\nu = 0,243$ |
| Módulo de Elasticidade | $E = 229,25 \text{ GPa}$ |
| Módulo de Cisalhamento | $G = 92,25 \text{ GPa}$ |

Este método é considerado bastante preciso e tem como principal vantagem a não destruição de corpos de prova, economizando assim material.

3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Processo de Fabricação das Placas Compósitas

O processo empregado foi o de empilhamento manual ou “hand-layup”. Este processo pode ser dividido em algumas etapas como: preparo do reforço, a pesagem do tecido e dos componentes da matriz polimérica, a preparação do molde e do local do empilhamento, o preparo da matriz polimérica, o empilhamento, a cura e desmolde e a fixação da placa cerâmica.

Dois formulações foram usadas na matriz polimérica e se resumem na Tabela 6.

Tabela 6: Formulações A e B (% em peso).

| Formulação | % de resina Epóxi | % de Endurecedor | % de flexibilizador |
|------------|-------------------|------------------|---------------------|
| A | 88 | 12 | 0 |
| B | 68 | 12 | 20 |

Fabricamos placas com vinte camadas de fibra de vidro na configuração [(0/90)₁₀] e colamos uma placa cerâmica de 12,7 mm de espessura no centro de cada laminado. Variamos os componentes da matriz Epóxi ao longo da espessura, ou seja, trabalhamos com duas formulações para a matriz conforme descrito anteriormente, fornecendo 5 tipos de laminado (Tabela 16):

- a) Formulação A em todas as vinte camadas (Figura 2a).
- b) Formulação A nas 5 primeiras camadas e formulação B nas outras 15 (a primeira camada é a camada onde está colada a placa cerâmica e recebe o primeiro impacto)(Figura 2c).
- c) Formulação A nas 8 primeiras camadas e formulação B nas outras 12 (Figura 2b).
- d) Formulação A nas 10 primeiras camadas e formulação B nas outras 10 (Figura 2d).
- e) Formulação B nas 20 camadas (semelhante ao laminado **a** variando apenas a formulação).

Em suma, acrescentamos ao laminado um gradiente de rigidez ao longo da sua espessura. Fabricamos duas placas para cada configuração. Todos os laminados mantiveram a relação fibra/matriz em torno de 60%. A espessura média dos laminados com vinte camadas de fibra de vidro foi de 3.85 mm e seu peso médio em torno de 553 g.

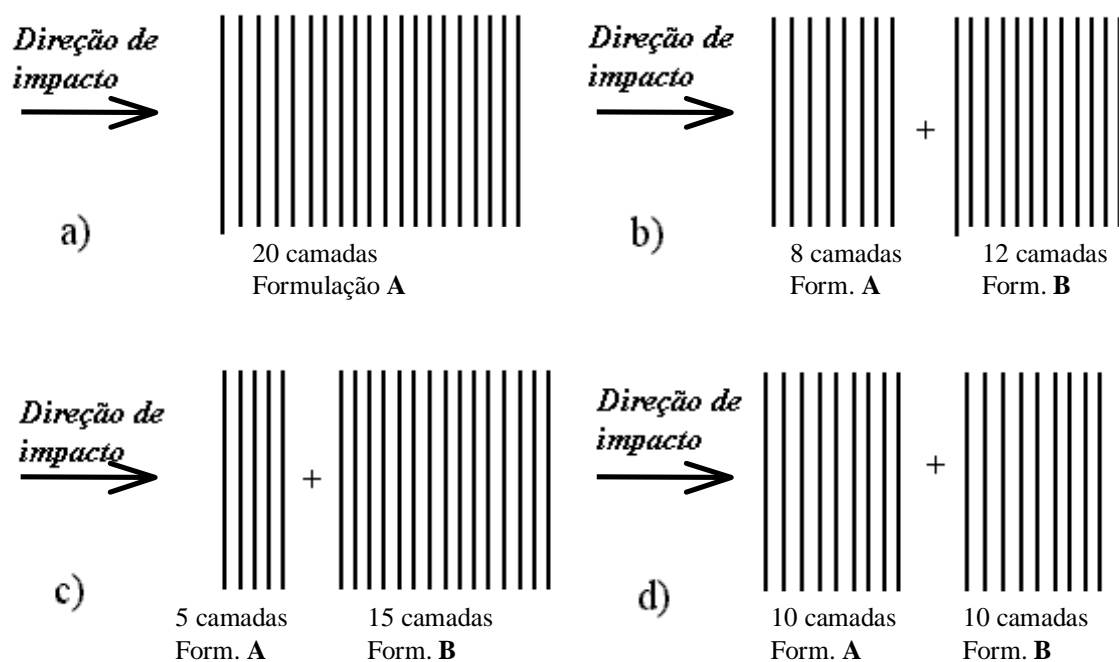


Figura 2. Laminados de fibra de vidro e suas respectivas configurações

3.2 Ensaio Balísticos

Os ensaios balísticos foram realizados no Campo de Provas da Marambaia (CprM). Para a realização dos mesmos, devemos considerar alguns fatores importantes:

a) Munição do teste

Optamos por trabalhar com as munições descritas na Tabela 7.

Tabela 7: Munição utilizada para testes.

| Calibre | Massa(g) | Velocidade(m/s) | Forma | Tipo |
|--------------|------------|-----------------|--------|------------|
| 7.62 x 51 mm | 9.3 ± 0.05 | 838 ± 15 | ogival | Encamisado |

Segundo a norma (NIJ 0108.01, 1981), o tipo de projétil padrão utilizado para teste em blindagens de nível III é o tipo apresentado na Tabela 7. E é este o nível de blindagem recomendado para veículos para transporte de valores (Ministério da Justiça, 1995).

b) Ângulo de Incidência

O projétil pode atingir o alvo em um impacto normal à superfície ou em impacto oblíquo. Segundo Acchar (1988) incidência normal corresponde à condição mais desfavorável para as blindagens.

c) Distância do Alvo

Os disparos devem ser feitos a uma distância de 5 m da boca do cano do provete. Na norma (NIJ 0108.01, 1981) para os calibres usados neste trabalho a recomendação quanto a distância é de 15 metros em relação à boca do cano do provete. Como a aprovação para o uso comercial na blindagem de carros de transporte de valores depende e está ligada a uma regulamentação nacional (Ministério da Justiça, 1995), optamos pela menor distância pois esta caracteriza uma condição mais crítica para o material que constitui a blindagem.

d) Velocidade do Projétil

O equipamento e o dispositivo para a medição da velocidade do projétil é constituído de um provete (Figura 3) de onde é disparado o projétil, um cronógrafo AVL B212 e duas barras ópticas AVL B470.

A velocidade do projétil calculada a partir dos dados do ensaio foi utilizada para a determinação da energia de impacto do mesmo, pois podemos aproximar à energia de impacto a energia cinética do projétil.

e) Condição de borda

A condição das bordas do laminado em teste tem um papel importante no seu comportamento sob impacto balístico. Optamos por engastar o laminado nos quatro lados tornando a condição de carregamento a mais crítica possível uma vez que nesta condição o laminado não tem como dispersar muita energia absorvida, durante o impacto, na forma de deflexão do mesmo. O suporte utilizado nos testes engasta as bordas da placa como uma moldura de um quadro, deixando uma área interna livre de 240x240 mm, ou seja, a moldura prende a placa numa faixa de 30 mm de largura nas quatro bordas uma vez que a placa tem 300x300 mm de lado. A geometria, ou seja, as dimensões do laminado estão intimamente ligadas com o comportamento do mesmo pois existe uma forte influência da condição de borda nos resultados.

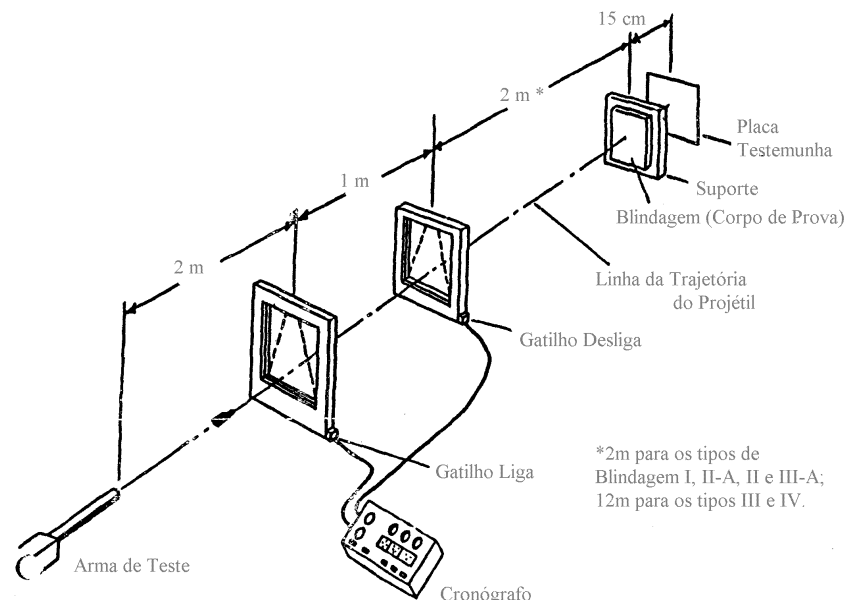


Figura 3. Configuração do teste balístico.

f) Colocação de uma placa testemunha

Segundo a norma americana, devemos colocar uma placa testemunha atrás do alvo a fim de determinar se houve ou não perfuração e se a blindagem pode ou não ser aprovada no teste. Haverá perfuração quando houver perfuração da placa testemunha.

A placa testemunha deve ser de uma liga de Alumínio 2024-T3 ou 2024-T4 com espessura de 0.5 mm e deve ser fixada paralelamente ao alvo 15 cm atrás do mesmo em relação ao provete de teste como mostrado na Figura 3. Nos ensaios realizados, a placa testemunha foi colocada a uma distancia de 8 cm e o material utilizado foi uma chapa de Alumínio de baixa resistência mecânica comparada à liga 2024 (ASM Handbook, 1996), o que caracteriza uma condição mais crítica do que na norma americana.

3.3 Métodos para Avaliação da Performance dos Corpos de Prova

Para avaliar a performance das placas compósitas testadas no trabalho, utilizamos uma metodologia própria.

Em primeiro lugar, logo após o disparo, observamos se houve ou não rompimento ou deformação da placa testemunha. Para cada placa compósita, colocamos uma nova placa testemunha, a não ser que não tivesse havido nenhum dano aparente na placa testemunha.

Outro parâmetro fundamental para se entender o que está ocorrendo com o material é a determinação do dano no laminado. O principal mecanismo de falha que atua em um laminado impactado é a delaminação entre as camadas de tecido (Ferreira, 1994). Nos laminados constituídos de fibra de vidro, é simples obter valores de área delaminada, pois os mesmos são transparentes à pequena intensidade de luz. Logo, utilizamos uma lâmpada comum de 100 W e observamos uma área mais escura em volta do ponto de impacto. Traçamos com um pilot o contorno desta área mais escura e digitalizamos a imagem da placa em um “Scanner” de mesa. Para o cálculo desta área delaminada, utilizamos um programa de análise de imagem (GLOBAL LAB) que calcula uma área pré determinada pelo usuário.

4. RESULTADOS

Definimos algumas variáveis que serão utilizadas nas análises dos resultados obtidos nos ensaios balísticos. Sendo **V** a velocidade do projétil, **Ec** a energia cinética do mesmo, **Ad** a área delaminada e **a** o comprimento da trinca. Com a finalidade de extrair o efeito da velocidade do projétil no resultado, dividimos a área delaminada pela energia cinética (Ad/Ec).

Todas as placas apresentaram ruptura por isso, conseqüentemente, não foram classificadas para o nível de blindagem requerido pela norma (NIJ 0108.01, 1981). Na Figura 4, é apresentada uma vista frontal de uma placa impactada. Notamos a geometria da fratura em forma de cruz e a placa testemunha perfurada, caracterizando assim perfuração da blindagem. Todas as placas de fibra de vidro apresentaram um comportamento semelhante com relação a geometria de fratura. Por este motivo optamos por determinar não só a área delaminada como também o comprimento das trincas de fratura, uma vez que foi consumida uma quantidade de energia considerável para formação das mesmas. Estes dois mecanismos parecem ser os principais mecanismos de absorção de energia por parte da placa compósita, uma vez que as placas não apresentaram uma deflexão relevante. Na Figura 5, observamos mais detalhadamente a região central do laminado, no qual se localizava a placa cerâmica que foi completamente fragmentada pelo impacto. As manchas escuras na região do impacto são o chumbo do projétil que foi consumido durante a penetração.

Na Figura 6, levantamos o gráfico Área Delaminada/Energia Cinética (Ad/Ec) por Número de Camadas Flexibilizadas (n) e na Figura 7 está representado o gráfico do Comprimento da Trinca de Fratura (a) por Número de Camadas Flexibilizadas (n).

Analisando os resultados, notamos uma certa competição entre os mecanismos de absorção de energia (delaminação e comprimento da trinca de fratura). Os laminados que apresentaram maior delaminação apresentaram também menor comprimento de trinca. A diferença de rigidez entre as camadas e o arranjo empregado para cada laminado influencia significativamente no comportamento do laminado sob impacto balístico. Fica evidenciado os diferentes comportamentos de um laminado dependendo do número de camadas flexibilizadas, conseguindo-se assim mais um ponto a ser estudado com o objetivo de otimizar a resposta de um laminado sob impacto.

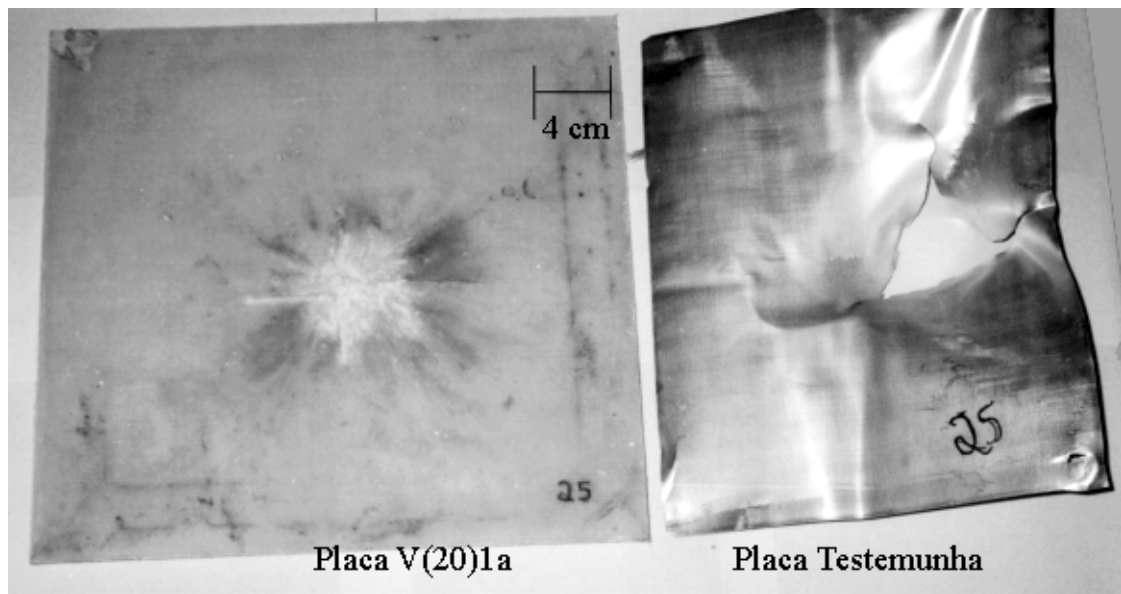


Figura 4. Placa tipo “a” e placa testemunha.

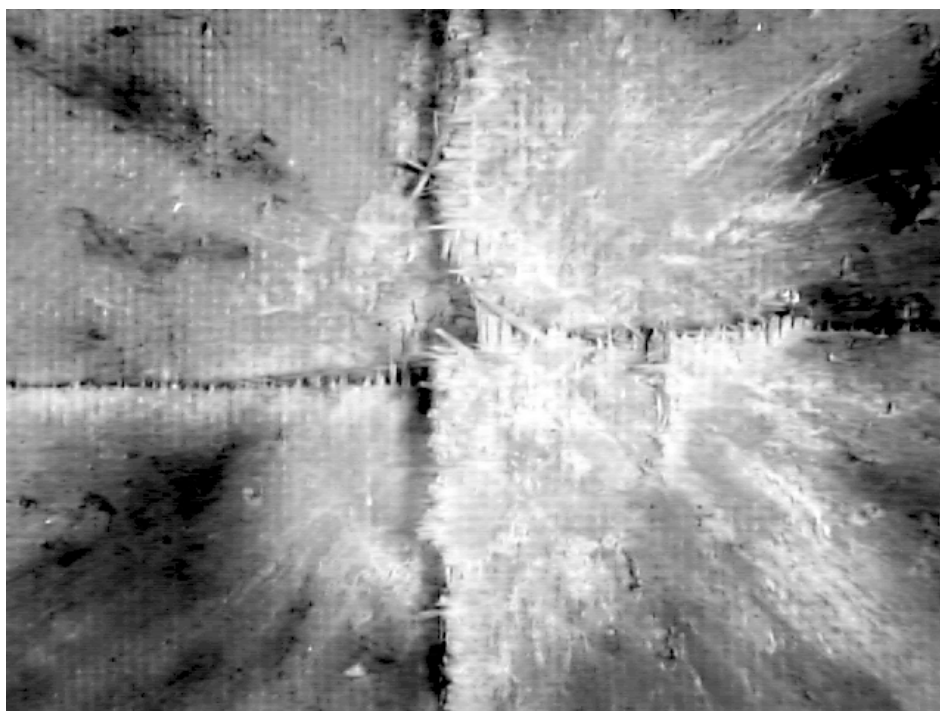


Figura 5. Região central da placa tipo “a”, fratura na forma de cruz.

O motivo pelo qual não foram testados outras placas de fibra de vidro com um número de camadas maior, uma vez que vinte camadas não foi suficiente para esta aplicação, é o fato do preço do metro quadrado de tecido de fibra de aramida ser duas vezes e meia mais caro do que de tecido de fibra de vidro e como veremos mais adiante apenas seis camadas de tecido de fibra de aramida são suficientes para esta aplicação. Isso demonstra que não compensa economicamente a utilização do tecido de fibra de vidro para esta aplicação.

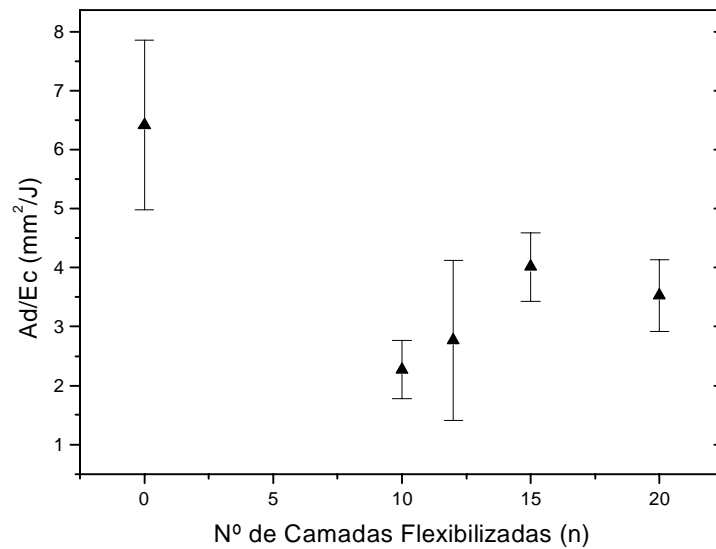


Figura 6. Gráfico Área Delaminada/Energia Cinética (Ad/Ec) x Número de Camadas Flexibilizadas (n).

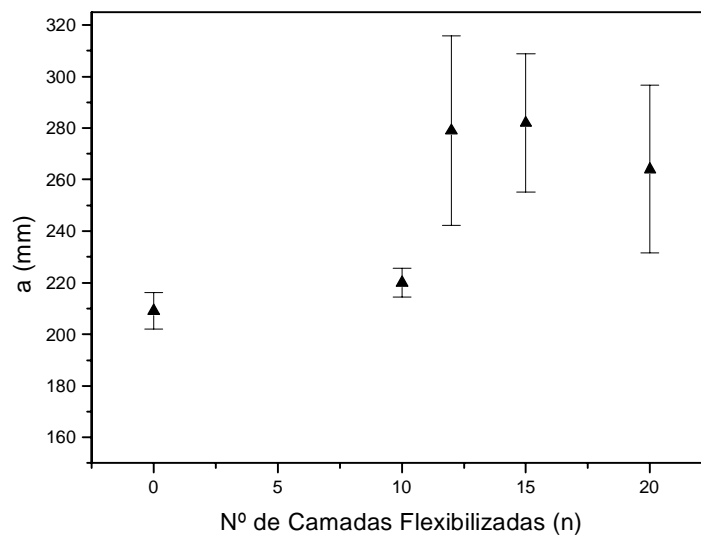


Figura 7. Comprimento da trinca de fratura (a) por Número de Camadas Flexibilizadas (n).

5. CONCLUSÕES

O laminado tem um papel fundamental no comportamento final da blindagem, tanto do ponto de vista das fibras como da resina e de sua configuração de montagem.

Notamos uma competição entre os mecanismos de falha dos laminados na absorção da energia proveniente do impacto balístico. Nas placas de fibras de vidro observamos que a delaminação compete com o comprimento das trincas, pois os dois processos consomem grande energia do impacto.

Placas compostas por tecido de fibra de vidro tipo E não são viáveis, do ponto de vista econômico, para o nível de proteção balístico objetivado no trabalho, já que não atingem o nível requerido de proteção com suas 20 camadas.

A variação na composição da resina, como o uso de agentes flexibilizadores e a implementação de um gradiente de rigidez no laminado, influencia diretamente no dano observado no laminado.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e FINEP, pelo financiamento e viabilização deste trabalho e ao Campo de Provas da Marambaia (CprM).

REFERÊNCIAS

- Acchar, R., 1988, Estudo do comportamento balístico de blindagens leves, Tese de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ASM Handbook, 1996, Typical Mechanical Properties of Various Aluminum Alloys, V.2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-purpose Materials, 10th ed, USA.
- d'Almeida, J. R. M., 1994, Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos decorrentes da variação das características físicas e processamento da matriz, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Dow Química S.A., 1996, comunicação privada.
- Ferreira, D. B. B., 1994, Comportamento mecânico de blindagens compósitas leves, Tese de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- NIJ 0108.01, 1981, National Institute of Justice, Ballistic Resistant Protective Materials - U.S. Department of Justice, Washington D.C., USA.
- Ministério da Justiça, 1995, Gabinete do Ministro, Portaria Nº 1.264, de 29 de setembro de 1995 - Diário Oficial, n. 189, Segunda-feira 2 de outubro de 1995, pp. 15344, Seção I.
- Vary, A., 1991, Material Property Characterization, Nondestructive Testing Handbook, v.7, ASTM Ultrasonic Testing, pp. 385-431.

DEVELOPMENT OF FIBERGLASS REINFORCED EPOXI AND ALUMINA COMPOSITE PLATES FOR BALLISTIC PROTECTION

Abstract. *An experimental study on the behavior of composite armor plates is presented. Various types of composite plates were produced aiming at the optimization in relationship to the damage caused by the impact. The plates consist of polymeric laminates reinforced by fiberglass with small Alumina ceramic plaques in front of them. Some variations on the laminate were studied, such as the composition of the resin, the fiber/matrix ratio, the type of fiber and layers with different values of resin rigidity. The armor performance was evaluated through ballistic tests using the 7.62 x 51 mm (308 Winchester) ammunition. A non-destructive technique (Transparency to light) was used in order to quantify the damage caused by the impact. The experimental results of the behavior of the different types of composite plates were related to the testes variables.*

Key words: *Composite Armors, Ballistic Impact, Composite Plates.*