

Influência do número de camadas de tecido no desempenho balístico de alvos de Kevlar® XP S103

Sérgio J Buffon Jr^{*1,2}, Paulo C Borges, Elaine C Azevedo³, Eduardo Sousa Lima³

¹Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar (Pq R Mnt/5), Curitiba, Brasil

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil

³Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Brasil

*buffon.pq5@gmail.com

RESUMO: O Exército Brasileiro iniciou sua própria linha de produção de coletes balísticos utilizando o Kevlar® XP S103 como matéria-prima. O desempenho balístico de proteções a base de tecido varia com a mudança do número de camadas de tecido sobrepostas. O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho balístico de amostras formadas pela sobreposição de lâminas de Kevlar®, costuradas por fio de nylon, impactados por projetis 9 mm com diferentes velocidades, observando a perfuração e indentação na plastilina. Verificou-se que o desempenho melhora com aumento do número de lâminas e que dez laminas atende aos requisitos de proteção da NIJ Standard 0101.04 com menores custos e massa.

PALAVRAS-CHAVE: Kevlar® XP S103. desempenho balístico. número de camadas.

ABSTRACT: Brazilian Army started its own ballistic vest production line using the Kevlar® XP S103 as basis material. Fabric-based protections ballistic performance varies with the change in fabric laying up. The objective of this work is to analyze the ballistic performance of samples formed by Kevlar® layers overlapping, sewn by nylon thread, impacted by 9 mm projectiles with different velocities, observing the perforation and plastiline indentation. Performance has been found to improve with the layers number rising and it was found that ten layers meet the requirements of the NIJ Standard 0101.04 protection with lower costs and mass.

KEYWORDS: Kevlar® XP S103. ballistic performance. Layers number.

1. INTRODUÇÃO

Com a realização dos Jogos Olímpicos Rio 2016 no Brasil e a conseqüente necessidade de garantir a segurança das delegações ocorreu o emprego de tropas do Exército Brasileiro junto às forças de segurança ao evento. Nesse contexto constatou-se a necessidade da aquisição de um grande número de coletes de proteção balística. Com base na necessidade de minimizar os custos, garantir a logística aumentando a disponibilidade do material de emprego militar em questão e em última análise a segurança dos militares iniciou-se a fabricação de coletes balísticos no Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar. Para compor os painéis balístico do colete foi utilizado o tecido de para-aramida Kevlar® XP S103, fio KM2® plus, ambos fabricado pela Du Pont. Tal possui vantagens na sua aplicação como maior relação resistência peso devido à sua construção multiaxial +45°/-45° [1], o que promove redução de traumas ao usuário e economia de até 10% em massa do colete quando comparado a outras famílias de tecido de aramida.

A referida proteção balística foi projetada por meio do empilhamento de camadas de tecido de Kevlar® XP S103 costuradas com fio de nylon. Nesse contexto, o colete foi dimensionado com determinado número de camadas a fim de garantir proteção condizente ao nível III-A da National Institute of Justice Standard 0101.04 [2]. É desejável dimensionar adequadamente o número de camadas tendo em vista que o limite balístico de uma blindagem, o qual pode ser aferido experimentalmente pelo V_{50} , a velocidade com a qual é possível impactar um projétil em uma blindagem com probabilidade de 50% de resultar em perfuração completa e 50% em perfuração parcial [3], está intimamente ligado à espessura da blindagem. O aumento desta também causa aumento no limite [4-6]. Além disso, a gramatura total do sistema figura dentre as variáveis que Cunniff elencou como determinantes no desempenho balístico de uma blindagem a base de tecido [7].

Conforme a *National Institute of Justice (NIJ) Standard*

0101.04 afere-se o desempenho balístico por dois critérios: indentação na plastilina menor que 44 mm (em casos de perfuração parcial) e não perfuração total da blindagem (no caso de perfuração total não se mede a indentação) [2]. A estimativa da segurança acerca da perfuração dos alvos pode ser dimensionada utilizando-se a Eq.1 [8].

$$V_{th} = (0.95)Kc\epsilon_r \sqrt[3]{\frac{(fd)^2 A_d}{m}} \quad (1)$$

v_{th} é a velocidade mínima de perfuração do alvo, K uma constante associada à construção do tecido, c a velocidade do som na fibra (raiz quadrada do Módulo elástico (E) pela massa específica (ρ) [9]), ϵ_r a elongação última das fibras, f um fator de forma da munição, o d o calibre da munição, m a massa da munição e por fim A_d a gramatura da solução balística. Nesse sentido, são desejáveis blindagens com v_{th} maiores que as velocidades máximas de ensaio, para cada nível previsto na NIJ.

Há também que se considerar os efeitos do trauma resultante da transferência do impacto do projétil ao corpo do usuário, os quais que podem causar sérios danos aos tecidos e órgãos do tórax ou abdômen do indivíduo [10]. A NIJ Standard 0101.04 considera que o máximo de indentação a ser mensurada em plastilina, utilizada como suporte ao colete e que simula a consistência do corpo humano é 44 mm para todos os níveis. Esse valor está associado a uma probabilidade de letalidade para o usuário próxima a 6% [11].

O diâmetro de cavidade formado na plastilina por transferência de energia oriunda do projétil pode ser aferido por meio da Eq. 3 [12].

$$D^3 + \frac{4Dm_p}{\pi A_d} - \frac{4m_p^2 V_p^2}{W^3 T e^{9,2} \pi A_d} = 0 \quad (2)$$

Donde D é o diâmetro da cavidade de deformação, M_p (g) é a massa do projétil, A_d (g/cm²) a gramatura do sistema, V_p (m/s) a velocidade do projétil, W e T são constantes

relacionadas ao corpo impactado. Do diâmetro de cavidade mede-se o volume indentado. Park, et al [13] apresentou uma solução gráfica que associa o diâmetro de cavidade, indentação e energia absorvida na plastilina cuja ameaça é o projétil 9 mm.

Esse artigo tem por objetivo estudar os efeitos do número de lâminas do tecido de Kevlar® XP S103 no desempenho balístico de alvos de Kevlar costurados com fio de nylon.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

- Tecido de Kevlar® XP S103: doação pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar. Tecido adquirido junto à Du Pont do Brasil S/A.)
- Plastilina, marca CORFIX, massa específica 1,70 g/cm³, disponível no laboratório balístico da Du Pont;
- Munição 9 mm Luger, fabricante Companhia Brasileira de Cartuchos: disponível no laboratório balístico da Du Pont;
- Fio de poliamida multifilamento torcido e retorcido 750/3 dtex, doação pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar;
- Tecido de nylon emborrachado gramatura 70 g/m², doação pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar e
- Plástico cristal de policloreto de vinila, espessura comercial de 0,10 mm doados pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar.

2.2 Dimensionamentos dos alvos

A segurança teórica ante à perfuração dos alvos balísticos fabricados nesse artigo foi calculada por meio da Eq.1. Para estimar a constante K, foi utilizado o equacionamento presente em [8], porém considerando a velocidade de onda longitudinal nas fibras equivalentes, resultante da construção +45°/-45° da geometria do tecido em questão, ou seja

$c'_t = \sqrt{2}c_t$ de acordo com a representação na Fig. 1. Dessa condição, vem $\kappa = \sqrt[3]{4\sqrt{2}\alpha\beta\gamma}$, onde α, β e γ são constantes do tecido, seguindo ainda a mesma referência, e os valores médio presentes no referido trabalho, tem-se $\sqrt[3]{4\alpha\beta\gamma} = 2,68$, donde vem $K = 3,00$, utilizados no neste artigo.

Dessa forma, aplicando na Eq.1 este coeficiente, os dados fornecidos pelo fabricante acerca do Kevlar® KM2 plus (E= 81,7 GPa, $\epsilon_r=3,85\%$, $\rho= 1440$ Kg/m³) sendo os mesmos dados para munição e a gramatura da lâmina de Kevlar XP S103 igual 0,51 kg/m² [1], tem-se a segurança dos alvos ante a perfuração qualificada conforme Tabela 1, variando-se o número de laminas em 6,8,10,12 e 14. Assumiu-se como alvo seguro apenas aquele cuja velocidade mínima de perfuração estimada fosse superior a velocidade máxima de ensaio.

Quanto à segurança acerca da deformação na plastilina, utilizou a Eq.2 para determinação do diâmetro de cavidade do trauma balístico associado. O volume indentado (Vol) em mm³, fora estimado conforme Eq. 3, considerando uma meia calota esférica de cavidade, em que D é o diâmetro da cavidade (mm) na plastilina.

$$Vol = \frac{\pi D^3}{12} \quad (3)$$

Tab 1: Qualificação da segurança dos alvos balísticos quanto à perfuração

Nome da amostra	Número de camadas	Vth estimado (m/s)	Velocidade de segurança (m/s)	Confiabilidade estimada
C14	14	509	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Seguro
C12	12	484	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Seguro
C10	10	455	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Seguro
C08	8 423	350	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Não-Seguro
C06	6	384	350	Seguro
			376	Seguro
			350	Não-Seguro

Para um tratamento matemático mais severo, serão utilizadas as constantes que remeterão a diâmetros de cavidades maiores e, por conseguinte, traumas maiores, ou seja, W=55 kg e T=2 cm [11]. A Eq.2 foi resolvida em D, empregando os dados da munição 9 mm (m= 8,0 g) e a gramatura da lâmina de Kevlar® XP S103 igual 0,51 kg/m² [1].

Na tabela 2 estão os diâmetros de cavidades estimados, variando-se o número de laminas em 6, 8, 10, 12 e 14. Nesta tabela também encontra-se a conversão no volume de indentação estimado pela Eq.3.

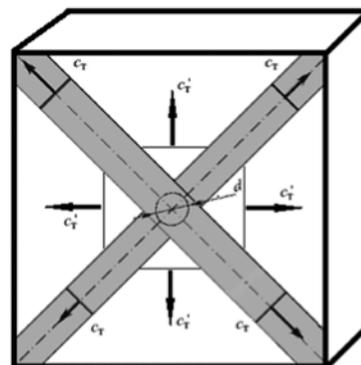


Fig. 1 – Representação da onda de deformação resultante da construção multiaxial, +45°/-45°, do tecido de Kevlar® XP S103.

Fonte: adaptado de [8]

Tab 2: diâmetros de cavidade e volumes de indentação esperados

Nome da amostra	Velocidade máxima de ensaio (m/s)	Diâmetro de cavidade de esperado (mm)	Velocidade de segurança (m/s)
14	350	48,8	30425
	376	52	36811
	445	59,9	56267
12	350	50,9	34524
	376	54,3	41915
	445	62,7	64532
10	350	53,5	40090
	376	57,1	48739
	445	66,1	75609
08	350	56,8	47975
	376	60,7	58551
	445	70,4	91346
06	350	61,2	60010
	376	65,6	73906
	445	76,4	116748

Procedeu-se então uma solução gráfica, considerando as conversões efetuadas no gráfico de *Park et al* [12], que relacionam volumes indentados, com a indentação e a energia absorvida pela plastilina. Os resultados podem ser vistos na Fig. 2.

Considerando o nível de segurança III-A, a solução gráfica do modelo teórico proposto indica que amostras com oito e seis lâminas estarão em situação não segura quanto ao limite de 44 mm de trauma balístico previsto na *NIJ Standard 0101.04*. Esta condição de não confiabilidade também se apresentou na análise do v_{th} . A indentação na plastilina esperada para cada velocidade máxima e número de camadas dos alvos balísticos prevista pelos níveis II-A, II e III-A da *NIJ* podem ser visualizados na Tabela 3.

3.2 FABRICAÇÃO DOS ALVOS BALÍSTICOS

Foram montados cinco alvos de Kevlar® XP S103, de dimensões 280 x 280 mm (± 10 mm).

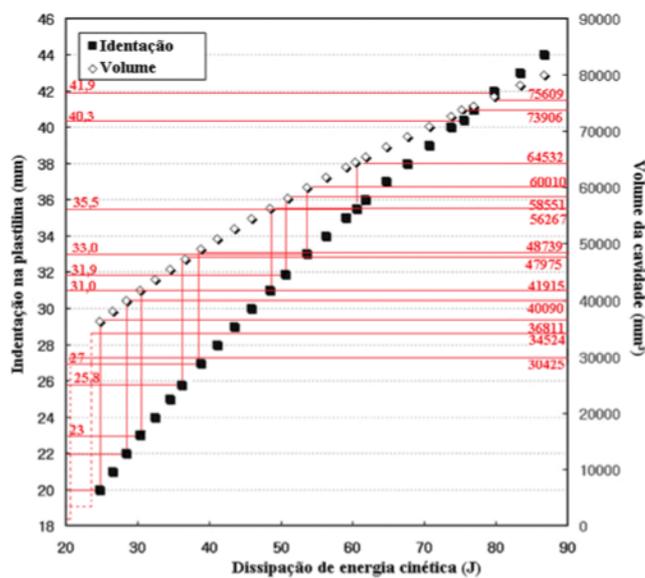


Fig. 2 – Solução gráfica para as indentações na plastilina, utilizando dados presentes à Tabela 2.
Fonte: adaptado de [12]

Tab 3: Indentação máxima esperada na plastilina para as velocidades máximas de ensaio

Nome da amostra	Velocidade máxima de ensaio (m/s)	Indentação esperado (mm²)
14	350	<20
	376	20
	445	31
12	350	<20
	376	23
	445	35
10	350	22
	376	27
	445	42
08	350	26
	376	32
	445	>46
06	350	33
	376	40
	445	>46

O tecido de Kevlar® será cortado com tesoura industrial de lâmina de 8 polegadas marca KM modelo AX-Q. A costura das amostras foi feita quadrada, 240 mm x 240 mm

(± 5 mm), em máquina de braço curto com transporte triplo marca Sun Special modelo 3166L18, com a linha de nylon multifilamento. As amostras foram protegidas com plástico de policloreto de vinila, espessura 0,10 mm, termosselados em suas extremidades por máquina de costura ultrassônica marca LANMAX modelo LM-100B. Este invólucro de PVC foi violado apenas no momento do ensaio balístico, bloqueando-se o efeito da umidade no desempenho balístico. Todas os materiais foram doados pelo Pq R Mnt/5 e as operações listadas anteriormente foram feitas na Seção da Organização Militar.

3.3 Ensaios

O ensaio balístico ocorreu no laboratório da empresa Du Pont do Brasil S.A, em Paulínea, SP, sendo realizado em temperatura ambiente de 27° C e umidade relativa de 70%. Os alvos foram fixados com tiras de velcro em recipiente de 610 mm x 610 mm x 140 mm preenchido com plastilina (Corfix®). As amostras receberam 6 impactos (obliquidade zero) de munições calibre 9 mm fabricadas pela Companhia Brasileira de Cartuchos (CBC), disponível no laboratório balístico. Também foi disponibilizada pelo local de testes a pólvora de base simples, fabricada pela Companhia Brasileira de Cartuchos (CBC) utilizada no ajuste das velocidades de ensaio conforme a norma. Os disparos foram executados com auxílio de uma estativa associada a um provete calibre 9 mm com mira a laser (projeto personalizado da Du Pont).

A distância da boca do provete ao alvo foi fixada em 5 metros. A velocidade do projétil foi medida por uma barreira ótica (Oeler). A indentação e o diâmetro de cavidade na plastilina foram mensurados por paquímetro digital (Starret) após a passagem de uma régua na superfície da massa, com o objetivo de retirar rebarbas e homogeneizar superfície.



Fig. 3 – Disposição da série de tiros.

Os diâmetros de cavidade medidos pelo paquímetro foram aqueles com maiores distâncias entre pontos diametralmente opostos, tendo em vista que as massas não ocorreram com disposição de esferas perfeitas. Os disparos ficaram 70 mm (± 10 mm) distantes entre si na vertical, 140 mm (± 10 mm) na horizontal e, no mínimo, a 70 mm (± 10 mm) das bordas conforme, seguindo a configuração disposta na Fig.3, semelhante à metodologia proposta por Kadir Bilisik [14].

Para a análise do mecanismo de falha das fibras de Kevlar utilizou-se Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN VEGA3 LMU do Centro de Microscopia Eletrôni-

ca da UFPR para proceder à análise das superfícies de fratura. Todas as amostras analisadas foram retiradas das regiões próximas da ocorrência do impacto balístico, sendo colhidos pedaços de tecido da primeira camada, da última e seguinte à parada do projétil.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios balísticos

A Tabela 4 apresenta os valores de indentação mensurados na plastilina, as velocidades de cada impacto bem como a presença ou não de perfuração total do alvo. Dos dados da tabela 1, verificam-se que ocorreram dois impactos fora dos limites de velocidade propostos pela norma, tiro 1 de C14 (452 m/s) e tiro 6 da amostra 3, mesmo assim, as amostras cumpriram os dois critérios avaliados, sem perfuração e indentação menor do que 44mm. Por análise de variância com confiabilidade de 95 %, concluiu-se pela semelhança entre as médias de indentações na plastilina considerando os tiros de 1 a 6 para as amostras C14, C12 e C10. De forma análoga, não se pode rejeitar a hipótese das médias iguais de C08 e C06 com a mesma confiabilidade.

A amostra C08 sofreu duas perfurações a 431 e 435 m/s, mostrando-se ineficiente para a ameaça em questão, corroborando com a predição inicial de que a condição de ensaio não era segura. Visando a manutenção da integridade do recipiente de plastilina somado ao fato de que a amostra com oito lâminas fora perfurada na velocidade de referência de 436 m/s, tal teste não foi realizado em C06.

Tab 4: Resultados do Ensaio Balísticos

Nome da amostra	Tiros	Velocidade de (m/s)	Perfuração	Indentação (m/m)
C14	1	452	Parcial	31
	2	429	Parcial	26
	3	372	Parcial	22
	4	368	Parcial	23
	5	346	Parcial	21
	6	349	Parcial	19
C12	1	440	Parcial	29
	2	435	Parcial	28
	3	364	Parcial	24
	4	365	Parcial	24
	5	348	Parcial	23
	6	348	Parcial	22
C10	1	435	Parcial	30
	2	435	Parcial	29
	3	363	Parcial	26
	4	366	Parcial	25
	5	350	Parcial	22
	6	352	Parcial	21
C08	1	431	Parcial	--
	2	435	Parcial	--
	3	364	Parcial	33
	4	374	Parcial	33
	5	348	Parcial	29
	6	346	Parcial	32
C06	1	369	Parcial	34
	2	368	Parcial	31
	3	359	Parcial	34
	4	358	Parcial	30
	5	346	Parcial	28
	6	347	Parcial	29

Porém, foram impactados mais dois tiros na velocidade de referência de 367 m/s, já que é o mais severo entre as duas modalidades restantes. É possível afirmar que as amostras C14, C12 e C10 estão dimensionadas para todas as ameaças apresentadas, ou seja atendendo aos níveis de segurança III-A da NIJ *Standard* 0101.04.

A amostra C14 a qual fora fabricada com maior número de lâminas, apresentou o melhor resultado quanto aos traumas balísticos, já que o maior o trauma sofrido por esta (31 mm) deu-se em velocidade superior ao máximo tolerável. Muito embora nas velocidades de referência de 436 m/s e 367 m/s C10 tenha o pior desempenho balístico, na velocidade de referência de 341 m/s (estando presente um impacto à 352 m/s, fora do previsto pela norma) C10 resultou em indentações menores que C12, que possui número maior de camadas de tecido.

As amostras C08 e C06 tem condições de proteger dois dos três níveis solicitados, mais precisamente os níveis II-A e II da NIJ 0101.04. C08 apresentou melhor desempenho para os disparos a 367 m/s \pm 9 m/s que C06. Porém, na amostra com laminado menos espesso, mensuraram-se menores indentações às velocidades do nível II-A (341 \pm 9 m/s).

Tabela 5: Correlação entre o número de lâminas de Kevlar® e a indentação na plastilina para cada velocidade de referência

Velocidade de referência	Coefficiente de correlação	Interpretação
436 m/s	-0,26	Fraca
367 m/s	-0,92	Muito forte
341 m/s	-0,84	Forte

Os coeficientes de correlação entre o número de camadas de tecido de aramida e a indentação na plastilina, para cada velocidade média de referência, estão presente na Tabela 5. Na Tabela 6 estão correlacionadas a velocidade de impacto e a indentação para cada amostra. O menor número de resultados disponíveis para análise nos impactos cuja a velocidade de referência é 436 m/s pode acarretar na fraca correlação existente entre os parâmetros analisados.

Nesse caso, foram computados os valores relativos aos dois disparos no nível III-A referentes a C14, C12 C10. Para as outras duas condições verifica-se que existe forte correlação entre a quantidade de camadas e o desempenho balístico ante ao trauma resultante, condição esperada pela análise das referências presentes na fundamentação teórica.

A correlação forte entre as velocidades de impacto e a indentação na plastilina apenas não se faz presente em C08, mais uma vez, provavelmente, pela menor quantidade de dados disponíveis. Por fim, a análise em questão remete à condição de que o trauma transmitido ao usuário poderá ser tanto maior quanto a energia do próprio projétil impactante.

A Tabela 7 traz a comparação entre profundidade de deformação máxima calculada pelo modelo teórico, utilizada para o dimensionamento inicial dos alvos balísticos, a aferição real bem como a percentagem de erro. Utilizou-se o mesmo número de algarismos significativos para os valores teóricos e reais. Da leitura da tabela verifica-se que o método proposto foi 100% assertivo em dois casos, para disparo à velocidade máxima de 445 m/s em amostra com 14 camadas e para disparo à velocidade máxima de 350 m/s em alvo com dez lâminas de Kevlar®. É importante ressaltar que o maior

valor de profundidade de deformação em C14 foi tomado por tiro à 452 m/s, 7 m/s maior que o máximo permitido pela NIJ Standard 0101.04.

Tem-se ainda que os maiores valores de erros, com módulo acima de 20 % ficaram relacionados ao nível III-A para C12 e C10. Erros intermediários, com módulos na faixa de 10 a 20% incidiram com maior intensidade no caso de C08 e C06, no nível II-A para as duas amostras, no nível II para apenas a amostra com seis camadas.

Tab 6: Correlação entre velocidade de impacto e a indentação na plastilina para cada amostra

Amostra	Coefficiente de correlação	Interpretação
C14	0,96	Muito forte
C12	0,99	Muito forte
C10	0,92	Muito forte
C08	0,68	Moderada
C06	0,75	Forte

Tabela 7: Cálculo de erro entre indentações máximas teóricas e aferidas para os níveis da NIJ em cada amostra

Nome da amostra	Nível NIJ 0101.04	Indentação máxima teórica (mm)	Indentação máxima aferida (mm)	Erro (%)
C14	III-A	31	31	0,0
	II	20	23	13,0
C12	III-A	35	29	-20,7
	II	23	24	4,2
C10	III-A	42	30	-40,0
	II	27	26	-3,8
	II-A	22	22	0,0
C08	II	32	33	3,0
	II-A	26	32	18,7
C06	II	40	34	-17,6
	II-A	31	29	-13,8
Erro médio				-5,2

É importante salientar que pelo modelo teórico as indentações máximas em C14 e C12 inerentes ao nível II-A estiveram abaixo de 20 mm, o que não ocorreu na prática, pois as deformações máximas mensuradas ficaram acima dos 20 mm inicialmente estimados.

Tab 8: Diâmetros de cavidade e velocidades de impacto para cada tiro nas amostras ensaiadas

Nome da amostra	Tiros	Velocidade de (m/s)	Diâmetro de cavidade (mm)
C14	1	452	74
	2	429	71
	3	372	69
	4	368	76
	5	346	63
	6	349	60
C12	1	440	72
	2	435	71
	3	364	69
	4	365	65
	5	348	69
	6	348	73
C10	1	435	71
	2	435	78
	3	363	66
	4	366	65
	5	350	69
	6	352	73

Nome da amostra	Tiros	Velocidade de (m/s)	Diâmetro de cavidade (mm)
C08	1	431	--
	2	435	--
	3	364	65
	4	374	62
	5	348	56
	6	346	62
C06	1	369	34
	2	368	31
	3	359	34
	4	358	30
	5	346	28
	6	347	29

Tab 9: Comparativo com cálculo de erro entre diâmetros de cavidade máximos teóricos e reais para cada velocidade.

Nome da amostra	Velocidade referência (m/s)	Diâmetro de cavidade estimado (mm)	Diâmetro de cavidade real (mm)	Erro (%)
C06	341	61	65	6,2
	367	66	67	1,5
C08	341	57	62	8,1
	367	61	65	6,2
C10	341	54	66	18,2
	367	57	70	18,6
	436	66	78	15,4
C12	341	51	73	30,1
	367	54	69	21,7
	436	63	72	12,5
C14	341	49	63	22,2
	367	52	76	31,6
	436	60	74	18,9
Erro médio				16,3

Do modelo também esperava-se situação de não segurança acerca de disparos em 436 m/s \pm 9 m/s, ou seja indentações acima de 46 mm acima do limite da NIJ 0101.04. O que ocorreu de fato foi a perfuração no alvo de 8 lâminas.

A Tabela 8 apresenta os diâmetros de cavidade mensurados nas mossas na plastilina, formadas pelos impactos balísticos em regiões de cone de deformação da parte posterior dos alvos em contato com a massa, nos impactos realizados dois em cada velocidade de referência para os níveis II-A, II e III-A previstos na NIJ Standard 0101.04.

A análise de variância dos dados de diâmetros de cavidades reais presentes à Tabela 8, para as amostras C14, C12 e C10, apontou novamente para a não rejeição da hipótese de igualdade entre as médias, com 95 % de confiabilidade. Também, assemelharam-se as médias de diâmetros de cavidade mensurados para C08 e C06, pelo mesmo procedimento na análise de variância.

Quanto às diferenças ocorridas nos valores de diâmetro de cavidades reais e aqueles calculados pela metodologia descrita, a Tabela 9 traz o comparativo entre esses valores, bem como o percentual de erro.

Foram encontrados seis valores de diâmetros de cavidade (dois para cada tipo de ameaça) porém a tabela em questão considera o maior valor obtido entre os dois a fim de comparar com o valor máximo teórico. A análise dos dados permite verificar que as amostras com menores gramaturas, amostras C08 e C06, apresentaram diâmetros de cavidade reais mais próximas dos valores esperados, com erros de módulos menores que 10%. Para as outras amostras com maior número

de lâminas de tecido, os erros superaram os 10% ultrapassando inclusive 30% em C12 e C14 (nos níveis II-A e II, respectivamente). Cabe ressaltar a não ocorrência de erros negativos, ou seja, os valores reais sempre foram maiores que os teóricos.

Tabela 10: Coeficientes de correlação entre velocidade de referência e diâmetros de cavidade reais com interpretação

Amostra	Coeficiente de correlação	Interpretação
C14	0,6	Moderada
C12	0,0	Muito fraca
C10	1,0	Muito forte
C08	1,0	Muito forte
C06	1,0	Muito forte

Nas três amostras as medidas associadas ao nível III-A da NIJ 0101.04 resultaram nos menores erros. Ainda, é visível que do modelo teórico derivam valores de diâmetros de cavidades cada vez menores a cada aumento de gramatura das soluções balísticas.

Porém, pela verificação dos valores reais tem-se que isto não necessariamente ocorre, uma vez que, por exemplo, o alvo de maior gramatura possui o maior diâmetro de cavidade para um impacto nível II. De maneira ainda a contrariar previsões, foram observados em C12 valor maior que o de C10 no nível II-A e menor que a C14 para o nível III-A.

Os coeficientes de correlação, levando em conta a variação de velocidade de referência para os diâmetros reais, bem como a interpretação do fenômeno estão presentes à Tabela 10. Três amostras obtiveram correlação muito forte entre o aumento de velocidades e o aumento das cavidades; em uma delas ocorreu correlação moderada e em outra praticamente inexistente.

3.2 Análises de fraturas

A Fig. 4 possui magnificação de 450 vezes de uma região de cone de deformação, ou seja, a parte posterior do alvo em contato com a plastilina, última camada da amostra C06, para um disparo a 347 m/s. Da imagem em questão verificam-se fraturas por estiramento e deformação por compressão irregular [15].

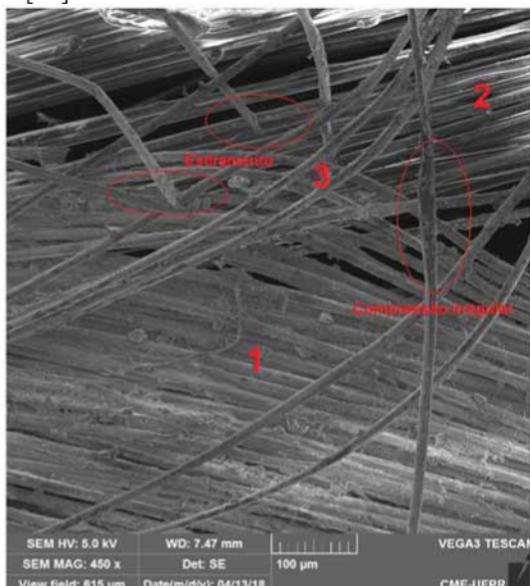


Fig. 4 – Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra C06 em região cone de deformação, impacto a 347 m/s

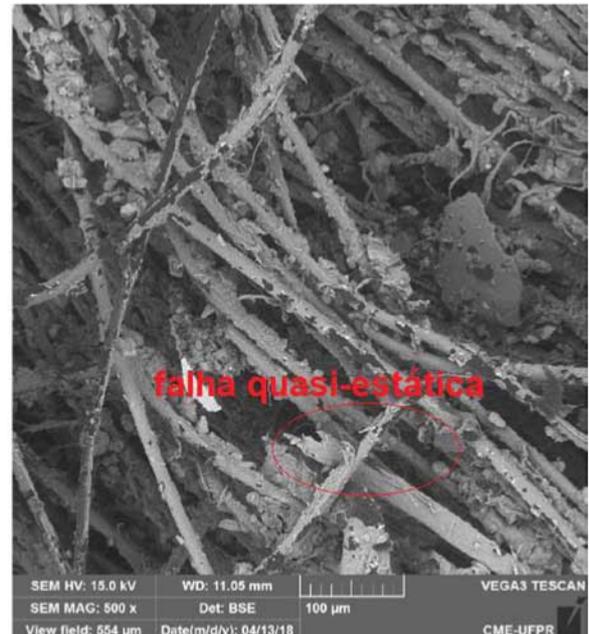


Fig. 5 – Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra C06 em região cone de deformação, impacto a 369 m/s.

A transmissão da frente de onda pela espessura do alvo até a última lâmina pode explicar o aparecimento de três regiões: 1 e 2 com feixes de fibra orientados em direções distintas, evidenciando a característica do tecido multiaxial pela noção de profundidade existente entre os dois feixes, ou seja, separação entre os feixes da própria camada, um fator de dissipação de energia inerente à própria construção do tecido, além da região 3 em que existe desorientação dos feixes de aramida, causada pela transmissão de energia cinética na área sob a ação direta do projétil, tendo em vista que a ação de compressão e perfuração do projétil cessou nas camadas anteriores.

Na Fig. 5 está representada a última camada do alvo C06, impactado pelo disparo 369 m/s, na região de cone de deformação, também em região de contato com a plastilina.

Apesar da presença predominante de artefatos nas amostras, os quais podem ter origem nos resíduos de queima de propelente, da fragmentação do projétil ou mesmo da plastilina incrustada, é possível visualizar regiões com desorientação generalizada e ainda setores em que a fibra de aramida sofreu deformação quasi-estática [15].

Muito embora o impacto balístico tenha ocorrido por projétil com maior velocidade que a Fig.4, foi possível verificar tipo de ruptura semelhante, no caso a quasi-estática. O fenômeno pode ser causado por duas possibilidades principais: compressão por parte da munição em seu processo de parada mais uma vez cessou nas camadas anteriores ou pelo fato de a frente de onda transmitida pelo impacto poder encontrar-se em estado desacelerado, o que a descaracterizaria como onda de choque.

Na Fig. 6 tem-se a análise de fratura da última camada de C08 4, amostra que sofreu perfuração total nos disparos 1 e 2, referentes ao nível III-A. Assim sendo, foi estudada a região contígua à perfuração do projétil para o impacto de maior velocidade.

Da observação da Fig.6 é possível verificar a maior incidência de fibras cisalhadas, apresentando plano de corte preferencial, e que falharam por compressão irregular em relação às fibras que romperam por estiramento.

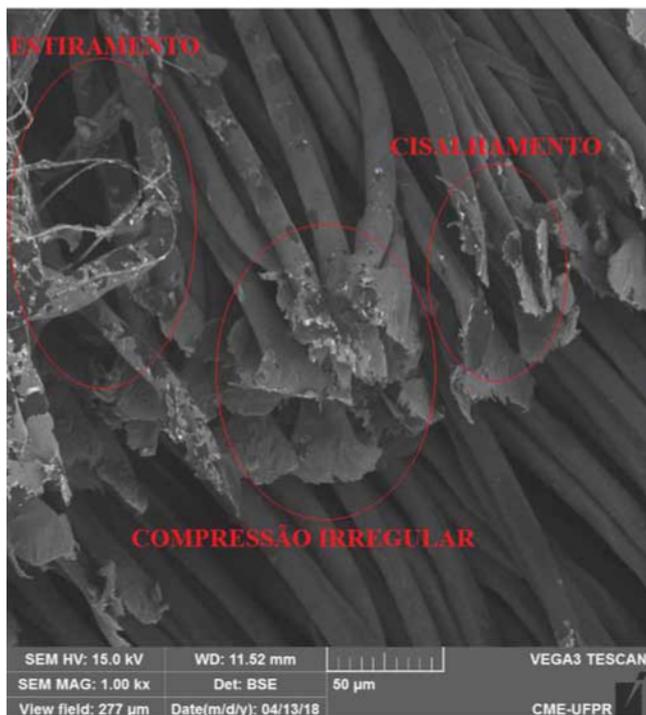


Fig. 6 – Análise de fratura por MEV da oitava camada da amostra C12 em região próxima à perfuração do projétil à 435 m/s.

É importante salientar que em fios de Kevlar® KM2 o módulo elástico é maior que o módulo de cisalhamento [16]. Isso pode resultar em um mecanismo de dissipação menos eficiente e a presença deste tipo de falha na última camada, causada muito provavelmente pela ação direta do projétil, corrobora com o fato de que a própria camada fora totalmente perfurada. Ou seja, uma condição de velocidade maior do que o v_{th} inerente ao alvo pode acarretar perfuração das camadas, pois a dissipação de energia pelas fibras ocorre de maneira deficiente por toda a espessura da blindagem.

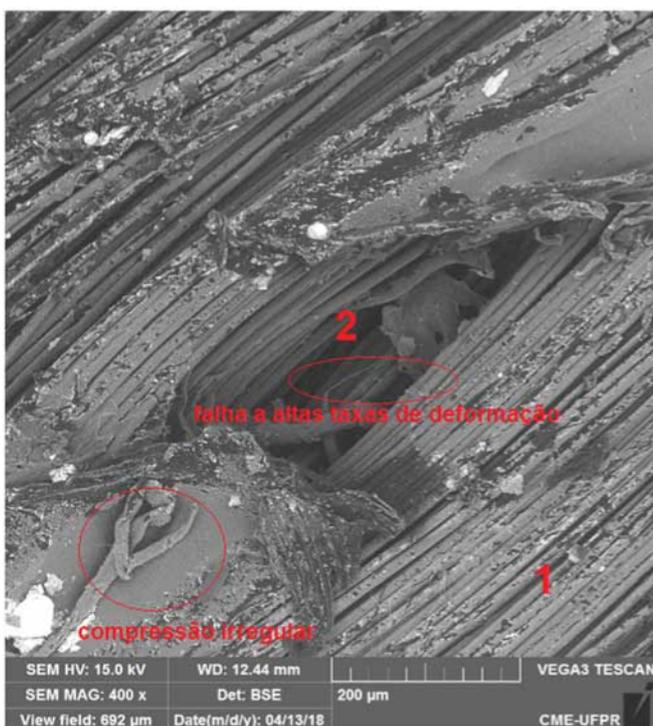


Fig. 7 – Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra C10 em região sob ação da compressão do projétil deformado nas camadas anteriores.



Fig. 8 - Análise de fratura por MEV da quarta lâmina de C12 em região de compressão do projétil com velocidade de 435 m/s (tiro 1).

Na Fig.7 visualiza-se a sexta camada do alvo C10, na camada imediatamente subsequente à parada do projétil, em uma região próxima à área diretamente comprimida pela munição, para o tiro número 2.

Embora a qualidade da imagem possa ter sido prejudicada provavelmente por efeitos térmicos oriundos do atrito do projétil com a lâmina anterior, é verificável a presença de regiões como a 1, em que os feixes de fibras ainda encontram-se sob orientação e uma região 2, em que os feixes foram afastados entre si, apresentando inclusive fratura característica da condição de falha a altas taxas de deformação por compressão transversal [15]. Tais esforços podem ser sido originários da desaceleração do projétil que ocorreu na quinta camada. O aparecimento de compressão irregular pode ter tido origem por semelhantes mecanismos.

Na Fig. 8 estão representadas as falhas referentes à quarta camada de C12, seguinte à que se deu a parada do projétil, em impacto numa velocidade de 435 m/s, em área abaixo da que fora comprimida pela munição.

São notáveis dois critérios de falha principais: por compressão irregular e estiramento. Nesse contexto, as falhas por estiramento nesse feixe de fibras fraturado encontra-se em maior número em relação ao fenômeno de compressão irregular. Essa região não possui ação direta do projétil, pois este se encontra já deformado e preso à camada anterior. É possível que as falhas por compressão irregular tenham sido originadas por carregamento e descarregamento ocasionado nas fibras pela mudança de geometria do projétil que comprime a área. A lâmina recebe, também, a onda transmitida que irá deslocar-se no sentido axial da fibra podendo estirá-la e gerar esforços mecânicos de natureza distinta daquela gerada pela compressão da munição deformada. Há uma região intermediária, onde as fibras não possuem fraturas características de observação imediata, o que pode ser um estado intermediário entre os mecanismos descritos ou um estágio em que ambos os efeitos operaram de forma simultânea para danificar e romper as fibras.

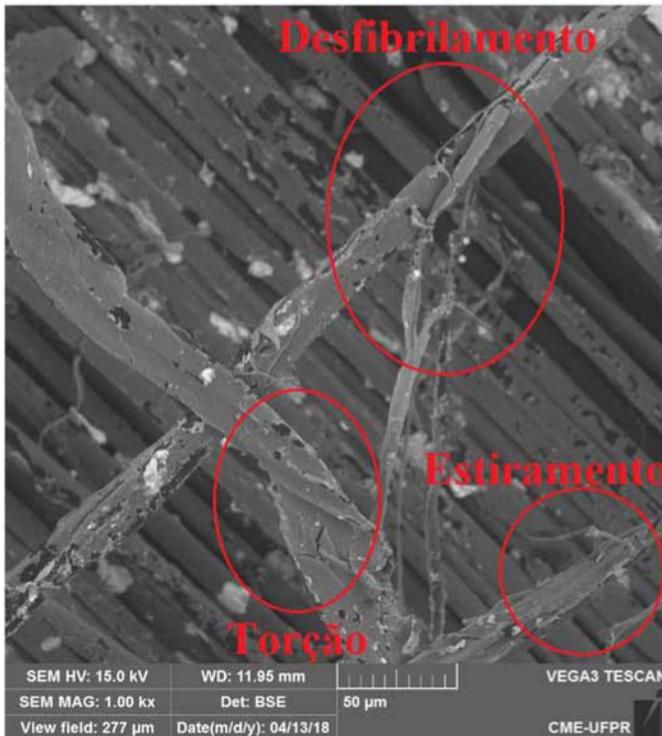


Fig. 9 - Análise de fratura por MEV da quinta camada de C14 em região comprimida pelo projétil em disparo a 452 m/s.

Já a Fig. 9, mostra fratura das fibras de aramida na lâmina de número 5 de C14, impactada à 452 m/s, em região comprimida pela munição, a qual se deformou por completo e teve parada na camada de número quatro. Nessa região são vistos esforços torcionais, os quais poderiam desencadear fratura por cisalhamento da fibra, o que não ocorreu em um estágio completo. Porém verifica-se que falhas por estiramento ocorreram em estágio completo, inclusive fratura por desfibrilação. Os mecanismos podem ter sido desencadeados devido à desaceleração do projétil em estado avançado ou pela frente de onda transmitida também encontrar-se bastante atenuada, pois o projétil parou na camada anterior. Porém, a transmissão de energia continuou por meio da espessura restante até atingir e deformar a plastilina.

5. CONCLUSÕES

Deve-se observar enfoque estatístico muito forte na avaliação do desempenho balístico por análise de traumas. A repetitividade dos resultados é possível, mas é necessário realizar um maior número de ensaios, sempre sendo essencial

observar as margens de variação nas velocidades do projétil, já existentes na norma. Há que se estabelecer, também, a possível faixa de variação das indentações na plastilina.

Ainda é possível inferir que, em impactos cuja velocidades do projétil se aproxima ao v_{th} , o modo de falha por cisalhamento torna-se evidente em relação a outros modos de falha, reduzindo a efetividade dos mecanismos de dissipação, mesmo motivo pelo qual surgiram perfurações nas camadas. Ainda assim, é importante salientar a ocorrência de uma variedade de fenômenos de fratura de fibra a cada lâmina de tecido perfurado. A incidência de falhas quasi-estáticas estiveram mais explícitas em regiões em que tanto o projétil como a frente de onda teoricamente encontram-se com velocidades mais atenuadas. Diversamente, as deformações e fraturas por compressão irregular estiveram presentes em variadas ocasiões. Contudo, estiveram mais comumente associadas a estágios de deformação do projétil e carregamentos por influência da frente de onda.

O método descrito no trabalho para aferição do diâmetro de cavidade apresenta limitações, pois o diâmetro tomado foi sempre o maior possível, em uma cavidade não circular. Porém como não é critério de avaliação pela *NIJ Standard 0101.04*, esse método pode ser utilizado para conversão em valores de indentação, incorrendo em erros menores.

Pode-se utilizar o método com ressalvas, para nortear o dimensionamento de alvos balísticos em condições semelhantes, diferentemente da previsão em relação ao teste balístico. Além disso, muitos dos traumas previstos ficaram acima dos reais, o que gerou confiabilidade ao projetista uma vez que colocou limites teóricos que não são alcançados no ensaio real.

Ainda em relação às limitações do modelo, essas são maiores quando a análise considera os impactos de nível III-A. Os limites teóricos possuem índices de erros maiores em comparação ao que se mediu, incorrendo no risco de superdimensionamento da solução balística. Por fim, é possível concluir que em menores gramaturas, o modelo remete a valores de segurança menores que os reais, porém, como as indentações finais diferiram em torno de 20 mm do máximo permitido pela *NIJ*, não se considera que acarrete em riscos ao projeto da blindagem.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Centro de Caracterização Multiusuário da UTFPR, ao Centro de Microscopia da UFPR; ao CNPQ, à CAPES, ao Parque Regional de Manutenção/5, e à Du Pont do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Du Pont. Datasheet: DuPont Kevlar® XP™ S103 Product Specification, 2013, http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics_fibersandnonwovens/fibers/documents/DSP_Kevlar_XPS103_datasheet_K23846_2.p f. Acesso em maio de 2018.
- [2] Ballistic Resistance of Personal Body Armor. NIJ Standard-0101.04, 2000
- [3] V50 Ballistic test for armor. MIL-STD-662F, 1997.
- [4] Song, J.W.; Egglestone, G.T.; Investigation of the PVB/PF Ratios on the Cross Linking and Ballistic Properties in Glass and Aramid Fiber Laminate Systems. Proc. 19th SAMPE International Technical Conference. 1987.pgs. 108-119.
- [5] Guoqi, Z.; Goldsmith, W.; C.K.H. Dharan. Penetration of laminated Kevlar by projectiles—II. Analytical model. Int. J. of Solids Struct, vol. 29, nr.4, 1992, pg. 421-436.
- [6] Hsieh, C. Y., Mount, A., Jang, B. Z., Zee, R. H. Response of polymer composites to high and low velocity impact. 22nd International SAMPE Technical Conference.1990. pgs. 14-27. Boston. USA.
- [7] Cunniff, P. M. Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. Proceedings of the 18th International and Symposium on Ballistics. 1999. San Antonio. USA.
- [8] Grigoryan, V. A., Kobylkin, I. F., & Bespalov, I. A. Comparative evaluation of ballistic resistance of textile armor packages against steel and lead bullets. Techniczne Wroby Włókiennicze, vol.17, 2009, pg. 58-63.
- [9] Shokrieh, M. M.; Javadpour, G. H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. Composite Structures. vol.82. nr.2, 2008, pg. 269-276.
- [10] Cannon.L. Behind armour blunt trauma-an emerging problem. Journal of Royal Army Medical. Corps, vol.147, nr.1, 2001, pg. 87-96.
- [11] Hanlon, E.; Gillich, P. Origin of the 44-mm behind-armor blunt trauma standard. Military medicine, vol. 177, nr. 3, 2012, pg. 333-339.
- [12] Prather, R. N., Swann, C., L., Hawkins, C. E. Backface Signatures of Soft Body Armors and the Associated Trauma Effects. 1977. Link: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a049463.pdf>. Acesso e maio de 2018.
- [13] Park, J. L.; Yoon, B. I.; Paik, J. G.; Kang, T. J. Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part II—Effect of fabric count and shot location. Textile Research Journal, vol. 82, nr. 6, 2012. pg. 542-557.
- [14] Kadir Bilisik, A., Turhan, Y. Multidirectional stitched layered aramid woven fabric structures and their experimental characterization of ballistic performance. Textile Research Journal, vol. 79, nr. 14, 2009, pg. 1331-1343.
- [15] Lim, J.; Zheng, J. Q.; Masters, K.; Chen, W. W. Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers. Internationak Journal of Impact Engeneering, vol. 38, nr. 4, 2011, pg. 219-227.
- [16] Cheng, M.; Chen, W.; Weerasooriya, T. Mechanical properties of Kevlar® KM2 single fiber. J Eng Mater Technology, vol. 127, nr.2, 2005, pg. 197-203.

