

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS

SÉRGIO JOÃO BUFFON JUNIOR

**INFLUÊNCIA DE INVÓLUCROS DE POLIURETANA E DO
NÚMERO DE LÂMINAS NO DESEMPENHO BALÍSTICO DE
BLINDAGENS DE KEVLAR® XP S103**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2018

SÉRGIO JOÃO BUFFON JUNIOR

**INFLUÊNCIA DE INVÓLUCROS DE POLIURETANA E DO
NÚMERO DE LÂMINAS NO DESEMPENHO BALÍSTICO DE
BLINDAGENS DE KEVLAR® XP S103**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia – Área de Concentração Engenharia de Materiais

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo César Borges

Co-orientador(a): Prof^a. Dr^a. Elaine Cristina Azevedo

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B929i Buffon Junior, Sérgio João
2018 Influência de invólucros de poliuretana e do número de lâminas no desempenho balístico de blindagens de Kevlar® XP S103 / Sérgio João Buffon Junior.-- 2018. 103 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2018.

Bibliografia: p. 95-100.

1. Polifenileno tereftalamida. 2. Envelhecimento.
3. Balística - Desempenho. 4. Engenharia de materiais.
5. Engenharia mecânica - Dissertações. I. Borges, Paulo César, orient. II. Azevedo, Elaine Cristina de, coorient.
- III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst.
- IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba
Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 322

A Dissertação de Mestrado intitulada: **INFLUÊNCIA DE INVÓLUCROS DE PU E DO NÚMERO DE LÂMINAS NO DESEMPENHO BALÍSTICO DE BLINDAGENS DE KEVLAR® XP S103**, defendida em sessão pública pelo candidato **Sérgio João Buffon Junior**, no dia 24 de maio de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: **Engenharia de Materiais**, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Paulo César Borges, Dr. – UTFPR

Prof. Neri Volpato, Ph.D. - UTFPR

Prof. Eduardo de Sousa Lima, Dr. - IME

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, ____ de _____ de 20__.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa

Buffon Jr. S. J. **Influência de invólucros de Poliuretana e do número de lâminas no desempenho balístico de blindagens de Kevlar® XP S103**. 2018, 103 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

RESUMO

Coletes de proteção balística são blindagens flexíveis utilizados na proteção individual contra o impacto de projetis. Dentre os materiais aplicados como matérias-primas balísticas destacam-se os tecidos à base de poliaramida, como o Kevlar® XP S103. O número de lâminas de tecido conjugadas nas blindagens é determinante para obtenção de proteções adequadas para os diferentes calibres e velocidades característicos dos projetis. Outro fator preponderante no desempenho balístico de blindagens à base de aramida é a proteção contra agentes de envelhecimento como água e radiação ultravioleta, os quais em contato direto com as blindagens podem acarretar significativas perdas de desempenho balístico. O objetivo deste trabalho é utilizar como proteção à umidade e radiação uma camada protetora de poliuretana derivada do óleo de mamona, medir o desempenho balístico de blindagens de Kevlar®/PU, comparando com uma solução em uso de nylon e policloreto de vinila termo selados e avaliar a performance de alvos com diferentes números de lâminas de Kevlar®, constituídos somente por tecido. A análise de desempenho balístico será normalizado pela *National Institute of Justice Standard 0101.04*, sendo verificada presença de perfuração completa nos alvos e indentação na plastilina. A análise de fratura nos alvos deu-se por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura, e as variações de natureza química provocadas por agentes de degradação foram avaliados por meio de espectroscopia de Infravermelho. Os melhores desempenhos balísticos foram obtidos nas amostras de Kevlar® recobertos com PU, tanto para as amostras não envelhecidas quanto para as degradadas pelos dois agentes. A adição da poliuretana foi mais efetiva do que o invólucro de nylon/PVC, mesmo assim, ocorreram mudanças nas estruturas químicas pelos agentes de envelhecimento em todas as amostras. Os alvos com maior número de lâminas apresentaram melhor desempenho balístico. Foram identificadas as proteções dimensionadas a cada nível balístico da NIJ Standard 0101.04, sendo aquelas com menor número de camadas de tecido de aramida não adequaram-se ao nível III-A da norma. O modelo teórico proposto no trabalho norteou a determinação dos resultados reais, ainda que erros fossem observados.

Palavras-chave: Kevlar® XP S103, envelhecimento, desempenho balístico.

Buffon Jr. S. J. **Influence of Polyurethane case and layers number in Kevlar® XP S103 armor based**. 2018, 103 p. Research project (Master's Degree in Mechanical and Materials Engineering) - Masters Dissertation – Post Graduation Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2018.

ABSTRACT

Ballistic protection vests can be used in individual protection against bullets impacts. Among the materials used as raw material, there are the polyamide-based fabrics, such as Kevlar® XP S103. The conjugated amour fabric layers number is decisive for designing to the different calibers and the projectiles velocities. Other main factors in the aramid based armors performance are the protection against aging agents like water and ultraviolet radiation, which in direct contact with the armor can lead to significant ballistic performance losses. This work aims to use of polyurethane derived from castor oil protection against aging agents such water and radiation, to measure Kevlar®/PU ballistic performance armors, comparing with a in use heat-sealed nylon and polyvinyl chloride solution and to evaluate the performance of different Kevlar® layers number targets, made only with fabric. The ballistic performance analyses were normalized by the National Institute of Justice Standard 0101.04, checking full perforation presence and plasticine indentation. The targets fracture analyze was performed by Scanning Electron Microscopy, and the chemical variation provoked by degradation agents were evaluated by Infrared spectroscopy. The better results were found in Kevlar® covered by PU samples, both to the unaged samples, as the degraded by the two agents. The polyurethane addiction was more effective than the nylon/PVC cases, even so, changes provoked by aging agents in chemical structure occurred in all samples. The targets with larger layers number presented better ballistic performance. There were identified armors designed for NIJ 0101.04, being the samples with the lowest aramid layers number not suitable to the standard III-A level. The theoretical model presented in the work pointed toward the real results, although errors were observed.

Keywords: Kevlar® XP S103, aging, ballistic performance

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, princípio lógico de todas as coisas, o único arquiteto do Universo, verdade absoluta e possibilidade mesma do ser e quem sem Ele nem o menos importante dos fenômenos físicos que dignamos de estudar aqui sequer existiria.

À minha esposa Grazi pelas incontáveis horas de apoio incontestado, com muitas “mãozinhas” providenciais em momentos de aperto, pela paciência e calma inesgotável como a brisa suave que acalenta a alma na calmaria pós tempestade e pelo amor que motiva e guia as ações de um homem de bem.

Aos meus pais Sérgio e Marilene, minha irmã Nath, por tudo o mais que fizeram ao longo das décadas, na formação moral e carinho inabarcáveis, que tanto auxiliaram na caminhada até aqui.

Aos mestres, no sentido ontológico da palavra, e amigos, Prof. Dr. Paulo Borges, orientador a quem o desafio da orientação fora da área de pleno domínio não traduziu-se em qualquer temor ou reticência mas sim em um sem par de ideias e soluções geniais que tanto engrandeceram este trabalho e abasteceram a mente ávida de conhecimentos de um engenheiro curioso, e à co-orientadora Profa. Dra. Elaine Azevedo, guia sempre presente e atenta com quem a imersão no mundo dos polímeros e compósitos tornou-se jornada profícua e prazerosa.

Ao Exército Brasileiro, nas pessoas dos diretores do Pq R Mnt/5 Coronel Damaso e Tenente Coronel Ferrari, do Chefe da Divisão Técnica Tenente Coronel Wendell e do “pai” da família de coletes JBJ, Major Juacy, que confiaram nesse soldado de Caxias a digna missão de pensar para proteger os irmãos de armas pelos rincões do nosso Brasil. À Instituição centenária que na década de serviço que até então dediquei às suas fileiras, retribuiu tão e somente em realizações pessoal e profissional. Ainda, aos companheiros de Seção de Correaria do Pq R Mnt/5, nas pessoas dos sempre leais e esforçados Sgt Junior e Sgt Edécio, que sempre estiveram ombreando fraternamente na árdua missão de produzir poder de combate.

Aos amigos André Bertin, Marcos Pellegrino, Gustavo Vilela e Matheus Marcondes da BCA Têxtil, Allan Gorham, Henrique Candia, Alexandre Hyodo e Renato Dantas da Du Pont do Brasil S.A, aos quais ficam sinceros votos de gratidão pela recepção no seio de suas firmas, as incessantes trocas de

conhecimentos e a concessão do apoio indispensável a este trabalho de pesquisa.

À CEQUIL pela doação da poliuretana, fundamental à realização do presente trabalho de pesquisa.

A todos os colegas e amigos do Laboratório de Polímeros e Compósitos, LAPOC, do PPGEM, em especial a Caroline de Paula e Felipe de Souza, cujo domínio de tudo o mais que poderia estar presente e acontecer no laboratório e disposição costumeira em colaborar auxiliaram enormemente.

A todos os professores do PPGEM da UTFPR, aos colegas do programa e a secretária Roberta Canto por todo auxílio e profissionalismo que na grande maioria das vezes não se manteve simplesmente na esfera administrativa.

Ao prof. Júlio Neves e ao incansável Alexandre Gonçalves do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR pelo excelente trabalho de microscopia cuja excelência aqui se reflete.

Ao Laboratório Multiusuário de Análises Químicas da UTFPR, em especial à técnica Rubia Bottini, pela presteza e assertividade nas análises de espectroscopia de infravermelho.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR, representado pelo técnico Luis Gustavo Matos e muitas das imagens de MEV que compõe essa dissertação.

À professora Rosilani Trianoski da Engenharia Florestal da UFPR e a contribuição essencial do Laboratório de Painéis de Madeira na fabricação de parte das amostras utilizadas no presente estudo.

À Capes, ao CNPq e à Fundação Araucária pelo auxílio financeiro aos laboratórios envolvidos.

A todos, que de uma forma ou outra tornaram possível, meu muito obrigado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista frontal do colete de proteção balística fabricado pelo Exército.....	22
Figura 2 - Vista frontal da placa balística utilizada no colete do Exército Brasileiro.....	23
Figura 3 - Configuração das macromoléculas da poliaramida.....	24
Figura 4 - Pregas radiais da fibra de poliaramida.....	24
Figura 5 - Síntese da poliaramida por condensação entre PPD e TCI.....	25
Figura 6 - (a). Mero da meta-aramida e (b) mero da para-aramida.....	26
Figura 7 - Representação da estrutura cristalina da aramida.....	26
Figura 8 - Reação de hidrólise da aramida.....	27
Figura 9 - Queda na Resistência à tração por exposição à radiação Ultra-violeta.....	28
Figura 10 - Entrelaçamento entre fios de trama e urdume no tecido plano.....	30
Figura 11 - Configuração de entrelaçamento (evidenciada pelas fibras do urdume a fibra escura da trama) (a) simples, (b) sarja, (c) cetim e (d) cesta.....	31
Figura 12 - Reação entre grupo hidroxilado e isocianato para formação de grupo uretano.....	33
Figura 13 - Representação da molécula do ácido ricinoleico.....	34
Figura 14 - Representação esquemática das regiões 1 e 2 e das fibras primárias e secundárias de um compósito à base de tecido.....	37
Figura 15 - (a) início do evento de impacto balístico e (b) início da compressão das camadas do laminado.....	38
Figura 16 - (a) (a) falha quasi-estática da fibra de Kevlar® por esforço de compressão transversal e (b) falha a altas taxas de deformação da fibra de Kevlar® por esforço de compressão transversal.....	38
Figura 17 – Deformação por compressão irregular da fibra de Kevlar®.....	39
Figura 18 - (a) onda de cisalhamento atingindo a traseira do alvo e (b) formação de deformação cônica.....	39
Figura 19 – Final do terceiro estágio, o projétil alcança a face oposta do alvo.....	40

Figura 20 – Comparação dos limites balísticos para amostras secas e imersas em água.....	44
Figura 21 – Relação entre energia cinética dissipada, profundidade de indentação na plastilina e volume de cavidade para projetis 9 mm.....	46
Figura 22 – Fluxograma dos métodos a serem executados no trabalho.....	48
Figura 23 – Caminho da frente de onda no tecido de Kevlar® XP S103.....	49
Figura 24 – Solução gráfica para as indentações na plastilina.....	52
Figura 25 – Preparação dos alvos envoltos por PU.....	54
Figura 26 – Configuração da série de disparos em alvo balístico.....	56
Figura 27 – Esquema da aferição de diâmetros de cavidade e indentação na plastilina após o aplainamento.....	56
Figura 28 - Representação da montagem experimental do ensaio balístico.....	57
Figura 29 – Indentação na plastilina em função da velocidade do projétil para os seis impactos balísticos nas amostras 08-S-N, 08-PU-N e 08-PU-A.....	57
Figura 30 – Solução gráfica para as indentações teóricas para a solução de Kevlar®/PU.....	62
Figura 31 – (a). Análise de fratura por MEV da terceira camada da amostra 08-S-N em região deformada pela onda de choque e (b) análise de fratura por MEV da última camada da amostra 08-S-N em região de cone de deformação.....	63
Figura 32 – (a). Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-S-A em região de perfuração do projétil e (b) análise de fratura por MEV da última camada da amostra 08-S-A em região de perfuração do projétil.....	64
Figura 33 – Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-PU-N em região de perfuração do projétil e (b) análise de fratura por MEV da primeira camada da 08-PU-A em região de perfuração do projétil.....	64
Figura 34 – Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®, uma seca e outra imersa em água por seis minutos.....	66

Figura 35 – Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®/PU, uma seca e outra imersa em água por seis minutos.....	67
Figura 36 – Indentação na plastilina em função da velocidade do projétil para os seis impactos balísticos nas amostras 08-S-N, 08-PU-N, 08-S-UV, 08-PU-UV, 08-Ny-N e 08-Ny-UV.....	68
Figura 37 – Energia cinética absorvida pela plastilina para as amostras 08-PU-N, 08-PU-UV, 08-Ny-N e 08-Ny-UV.....	69
Figura 38 - (a) Análise de fratura por MEV da primeira camada da Amostra 08-S-UV em região adjunta à perfuração e (b) análise de fratura por MEV no cone de deformação, oitava camada, da amostra 08-S-N.....	70
Figura 39 – (a) Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-PU-N em região vizinha à perfuração e (b) análise de fratura por MEV da amostra 08-PU-UV, face frontal, próxima à perfuração.....	71
Figura 40 – (a) Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-Ny-N em região vizinha à perfuração e (b) análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-Ny-UV também em região próxima à perfuração do projétil.....	72
Figura 41 – Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®, uma não envelhecida e outra irradiada por UVC durante 1.100 horas.....	73
Figura 42 – Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras, uma de Kevlar® puro outra de Kevlar®/PU. Nenhuma das amostras foi envelhecida.....	74
Figura 43 – Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®/PU, uma não envelhecida e outra irradiada por UVC durante 1.100 horas.....	75
Figura 44 – Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR) amostras de Kevlar® envolvidas por proteção de nylon, modo transmitância, uma não envelhecida e outra irradiada por UVC durante 1.100 horas.....	76
Figura 45 – Resultados dos ensaios balísticos relativos aos Grupo 2, relacionando indentação e velocidades.....	77
Figura 46 – Gráfico de dispersão, velocidade versus indentação, referentes às amostras A14, A12 e A10.....	81

Figura 47 – Gráfico de dispersão, velocidade versus indentação, referentes às amostras A8 e A06.....	81
Figura 48 – Resultados dos ensaios balísticos relativos aos Grupo 2, relacionando diâmetro de cavidades e velocidades.....	82
Figura 49 – Gráfico de dispersão, velocidade versus diâmetro de cavidade, referentes às amostras A14, A10 e A08.....	83
Figura 50 – Gráfico de dispersão, velocidade versus diâmetro de cavidade, referentes às amostras A12 e A06.....	84
Figura 51 – Gráfico de dispersão, diâmetro de cavidade versus indentação, referentes às amostras A14, A10 e A08.....	85
Figura 52 – Gráfico de dispersão, diâmetro de cavidade versus indentação, referentes à amostras A12 e A06.....	86
Figura 53 – Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra A06 em região cone de deformação, impacto a 347 m/s.....	87
Figura 54 – Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra A06 em região cone de deformação, impacto a 369 m/s.....	88
Figura 55 - Análise de fratura por MEV da oitava camada da amostra A08 em região próxima à perfuração do projétil à 435 m/s.....	88
Figura 56 - Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra A10 em região de compressão do projétil deformado.....	89
Figura 57 - Análise de fratura por MEV da quarta lâmina da amostra A12 em região de compressão do projétil com velocidade de 435 m/s (tiro 1).....	90
Figura 58 - Análise de fratura por MEV da quinta camada da amostra A14 em região sob a ação direta do projétil em disparo a 452 m/s.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de proteção e suas ameaças associadas	21
Tabela 2 – Parâmetros de rede cristalina da aramida	26
Tabela 3 – Energias de ligação e os comprimentos de onda associados.....	27
Tabela 4 – Propriedades das fibras comerciais de Kevlar®	29
Tabela 5 – Propriedades do tecido de Kevlar® XP S103	32
Tabela 6 – Propriedades mecânicas da poliuretana	34
Tabela 7 – Velocidade mínima de perfuração (v_{th}) estimada e confiabilidade ante ameaças de nível II, II-A e III-A da NIJ 0101.04.....	49
Tabela 8 – Solução das equações 11 e 14 com variação no número de lâminas de Kevlar® para as velocidades máximas dos níveis II-A, II e III-A da NIJ <i>Standard</i> 0101.04.....	52
Tabela 9 – Definições acerca do Grupo 1 de amostras, quanto aos alvos e ao procedimento experimental.....	54
Tabela 10 – Condições das amostras e ensaio para o Grupo 2.....	55
Tabela 11 – Comparação entre indentação máxima teórica e indentação máxima real.....	78
Tabela 12 – Correlação entre o laminado e a indentação na plastilina para cada velocidade de referência.....	80
Tabela 13 – Correlação entre velocidade de impacto e a indentação na plastilina para cada amostra.....	80
Tabela 14 – Correlação entre o número de camadas e o diâmetro de cavidade para cada velocidade de referência.....	82
Tabela 15 – - Correlação entre velocidade de impacto e o diâmetro de cavidade para cada amostra.....	83
Tabela 16 – Correlação entre indentação e o diâmetro de cavidade para cada amostra.....	85
Tabela 17 – Resultados dos ensaios balísticos para o Grupo 1(a).....	102
Tabela 18 – Resultados dos ensaios balísticos para o Grupo 1(b).....	103
Tabela 19 – Resultados dos ensaios balísticos para o Grupo 2.....	104

LISTA DE SÍMBOLOS

U^*	resistência específica da fibra vezes velocidade da onda de tensão
σ_r	tensão à ruptura da fibra
ϵ_r	elongação à ruptura da fibra
ρ	massa específica da fibra
m_p	massa do projétil
M_A	massa de tecido adjunta ao impacto do projétil
M_D	massa de tecido deformada
v_i	velocidade incidente do penetrador
V_{th}	<i>threshold velocity</i> , velocidade mínima para perfuração completa de um alvo
E	módulo de elasticidade da fibra
β	constante relativa ao aumento de área do tecido impactado em comparação com a área de seção transversal do projétil
c_e	equivalente de velocidade da frente de onda nas fibras sob ação de um projétil
α	constante de proporcionalidade entre o equivalente da frente de onda a velocidade da frente de onda
c	velocidade da frente de onda nas fibras
γ	constante de proporcionalidade do alongamento até a ruptura do fio e o calibre do projétil
X	fração de massa abaixo do projétil
f	fator de deformação do projétil
K	constante referente à construção do tecido balístico
t_p	tempo de perfuração do projétil
M_b	massa deformada da blindagem
m_p	massa do projétil
V_p	velocidade do projétil
d	calibre do projétil
W	constante associada à massa do corpo impactado
T	constante associada a constituição do corpo impactado
V_{50}	limite balístico

- Θ** constante do material na Equação de Song e Egglestone
- δ** constante exponencial relativa ao material na Equação de Song e Egglestone
- A_d** gramatura da blindagem
- n** número total de lâminas de Kevlar[®]
- r** fração de massa de resina na blindagem
- \bar{X}** relação entre área de seção de um projétil vezes a gramatura da solução dividida pela massa do projétil
- D** diâmetro de cavidade na plastilina

LISTA DE ABREVIATURAS

EB	Exército Brasileiro
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
FMJ	Full Metal Jackted
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
MIL-STD	Military Standard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NIJ	National Institute of Justice
PEUAPM	Polietileno de ultra-alto peso molecular
PPD	p-fenileno diamina
Pq R Mnt/5	Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar
PU	Poliuretana
PVC	Policloreto de Vinila
TCI	Dicloreto de tereftaloíla
Tg	Temperatura de transição vítrea
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.	Coletes de proteção balística	21
2.2.	Kevlar®	23
2.2.1.	Aramida	23
2.2.2.	Agentes de envelhecimento	27
2.2.3.	Propriedades das fibras e tecidos	28
2.2.4.	Propriedades balísticas das fibras e tecidos	32
2.3.	Poliuretana	33
2.4.	Comportamento balístico de blindagens à base de tecidos	35
2.5.	Considerações finais	45
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1.	Fluxograma de trabalho	47
3.2.	Materiais	47
3.3.	Métodos	48
3.3.1.	Metodologia de dimensionamento dos alvos	48
3.3.2.	Preparação dos alvos	52
3.3.3.	Ensaio balísticos	55
3.3.4.	MEV	58
3.3.5.	FTIR	58
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1.	Grupo 1 (a)	59
4.1.1.	Desempenho balístico	59
4.1.2.	Análise de fraturas	63
4.1.3.	FTIR	65
4.2.	Grupo 1 (b)	67
4.2.1.	Desempenho balístico	68
4.2.2.	Análise de fraturas	70
4.2.3.	FTIR	72
4.3.	Grupo 2	76
4.3.1.	Desempenho balístico	76

4.3.2.	Análise de fraturas	86
5.	CONCLUSÕES	93
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	96
	APÊNDICE A-RESULTADOS DOS ENSAIOS BALÍSTICOS DOS GRUPO 1 E GRUPO 2	102

1. INTRODUÇÃO

A utilização de blindagens é essencial quando levados em conta os cenários atuais dos teatros de operações modernos, em que a guerra assimétrica e a guerrilha urbana estão entre os principais tipos de conflitos armados (PINTO, 2009). Nesse contexto, as Forças Armadas e policiais têm ao longo dos anos investido na proteção da integridade física dos combatentes de modo a garantir sua permanência no campo de batalha, aplicando recursos em proteções individuais mais sofisticadas e com maior grau de tecnologia aplicada. Essas proteções denominadas de coletes de proteção balística são proteções contra impactos de projetis de elevada energia cinética, não só impedindo perfurações ao corpo dos usuários mas também reduzindo significativamente a probabilidade do seu portador sofrer danos resultantes do choque balístico em seus órgãos internos, danos esses incapacitantes e muitas vezes letais (MONTEIRO, 2007).

O Exército Brasileiro por necessidades advindas da participação de suas tropas nos Jogos Olímpicos Rio 2016 iniciou sua própria produção de coletes de proteção balística nível III-A, segundo a *National Institute of Justice* (NIJ) 0101.04, sendo escolhido o tecido de aramida Kevlar XP[®] S103 da Du Pont como material base para composição dos painéis de proteção balística. Sendo a última geração das famílias dos tecidos de Kevlar[®] (DU PONT, 2013), de processamento facilitado bastando realizar as operações de corte no infesto com número de camadas de tecido adequada ao nível que se deseja e costura perimetral ou em travetes.

Um dos principais parâmetros para o dimensionamento de uma blindagem é o número de lâminas de tecido que devem ser conjugadas afim de garantir proteção à determinada ameaça (BHATNAGAR, 2006). Esse parâmetro também é determinante nos custos do colete e na massa que o portador terá de carregar, o que afeta diretamente na sua mobilidade (LOIOLA JUNIOR, FERREIRA, 2016).

Outro aspecto que deve ser observado no projeto de blindagens à base de aramida é a redução de desempenho mecânico e balístico por agentes de envelhecimento como umidade e radiação ultravioleta (MEAD *et al*, 1982; DU PONT, 2010; ZHANG, 2006; NASCIMENTO, 2014; LI, 2016). Dessa forma, há

especial interesse no desenvolvimento de invólucros para as blindagens, resguardando a validade do material desde sua fabricação até o uso na sua atividade fim.

Para assegurar proteção eficaz à radiação e impermeabilização do tecido são geralmente empregados policloreto de vinila e poliamida 6.6 (nylon), sendo normalmente necessário termo selar esses materiais (KIRKWOOD, *et al*, 2004), insumos não biodegradáveis e cuja aplicação necessita de processos mais sofisticados.

Como alternativa, esta pesquisa propõe a aplicação de uma camada protetiva de poliuretana derivada de óleo de mamona, por todo pacote balístico. O emprego da PU se justifica pelo fato de que o material em questão é um produto biodegradável, de aplicação simples; em relação aos processos de termo selagem; sendo ainda resistente à degradação por umidade e à irradiação por ultravioleta (ANAGREH, 2008, AZEVEDO, 2009; CANGEMI, 2010), possibilitando a redução dos efeitos provocados pelos agentes de envelhecimento no tecido de aramida.

O objetivo deste trabalho é investigar a influência do número de lâminas de tecido de aramida Kevlar® XP no desempenho balístico de alvos à base desse tipo de tecido e sua adequação à determinados tipos de ameaças. Além disso, deseja-se estudar os efeitos dos agentes de envelhecimento, água e radiação UV, na performance balística de alvos com e sem camada protetora de poliuretana. A estes, também será comparado o comportamento solução de nylon/PVC termoselados, normalmente utilizado na produção de invólucros de coletes, para o caso da degradação por irradiação.

A performance dos diferentes alvos será verificado por meio de ensaio normalizado utilizando parâmetros da *National Institute of Justice Standard* 0101.04. Será verificada a indentação na plastilina a cada dois impactos no calibre 9 mm *Full Metal Jackted* nas velocidades estabelecidas nos níveis II-A, II e III-A da NIJ 0101.04. Os diferentes efeitos produzidos nas fibras e na PU dos alvos balísticos serão caracterizados por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura.

É desejável o aumento do desempenho balístico na blindagem Kevlar/PU já que a associação de resina a tecidos geralmente incorrem em ganhos de desempenho balístico tanto contra os efeitos de perfuração do projétil e de

deformação por transmissão da onda de choque resultante do impacto balístico (GOPINATH; ZHENG; BATRA, 2012; DA SILVA 2014).

A oportunidade de contribuição à pesquisa inerente a este trabalho se dá pelo fato de que o material balístico utilizado é novo, não se verificando fontes disponíveis na literatura suficientes acerca do dimensionamento seguro de coletes balísticos, nem mesmo uma metodologia que cumpra esses objetivos.

Outro aspecto importante é a quantificação da perda de desempenho balístico pelos agente de envelhecimento tanto em um padrão já utilizado no Exército tanto para a sugestão de invólucro de PU. Nesse contexto, a aplicação de invólucro de maior simplicidade de aplicação e de melhor aspecto sustentável, ganha ainda mais importância uma vez que pode acarretar em aumento de desempenho se comparado com uma blindagem de mesma gramatura.

A presente dissertação traz no seu capítulo 2 os aspectos teóricos sobre coletes balísticos, Kevlar[®], poliuretana e comportamento balístico de blindagens. No capítulo 3 é apresentada a metodologia do trabalho: materiais e métodos utilizados. No capítulo 4 tem-se os resultados e a discussão acerca dos ensaios efetuados. As conclusões extraídas dos assuntos anteriormente abordados estão dispostas no capítulo 5. O capítulo 6 traz sugestões para trabalhos futuros, e o capítulo 7 as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo destina-se a discorrer sobre aspectos conceituais a respeito de coletes de proteção balística, das matérias-primas utilizadas para fabricação dos alvos balísticos utilizados neste trabalho: Kevlar® e Poliuretana e do comportamento balístico de blindagens à base de tecido.

2.1. Coletes de proteção balística

Os coletes balísticos são materiais de emprego militar destinados a proteger os usuários de ameaças de objetos projetados com elevada energia cinética. Um colete balístico não garante 100% de segurança, porém reduz significativamente a probabilidade do seu portador sofrer danos que o levem à incapacitação ou mesmo a óbito. Assim sendo, é essencial para a segurança individual a compatibilidade entre o nível de proteção balística e a ameaça a qual o colete destina proteger (MONTEIRO, 2007).

A *National Institute of Justice Standard 0101.04* define os níveis de proteção balística conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis de proteção e suas ameaças associadas segundo à *NIJ Standard 0101.04*

Fonte: adaptado de USA, 2000

Nível de proteção	Munição de teste	Massa da munição (g)	Velocidades de referência(m/s)
I	.22 de chumbo, arma longa, nariz rombudo	2,6	329
	380 jaquetada de nariz rombudo	6,2	322
II-A	9 mm jaquetada de nariz rombudo	8,0	341
	40 Smith & Wesson jaquetada	11,7	322
II	9 mm jaquetada de nariz rombudo	8,0	367
	357 Magnum jaquetada de ponta macia	10,2	436
III-A	9 mm jaquetada de nariz rombudo	8,2	436
	44 Magnum jaquetada de ponta oca	15,6	436
III	7,62 mm NATO jaquetada	9,6	838
IV	.30 M2 perfurante	10,8	869

Para fins de classificação, os coletes balísticos podem subdividir-se em (AEP, 2014):

- *Soft armour*: proteção flexível, geralmente fabricada com tecidos de proteção balística e dimensionada para os níveis I, II-A, II e III-A.
- *Hard armour*: proteção rígida, normalmente fabricada com cerâmicos ou compósitos à base polietileno-de-ultra-alto-peso-molecular (PEUAPM) conformados por pressão e temperatura e dimensionada para os níveis III e IV. Pode atuar sozinha (*Stand Alone*) ou em conjunto com uma blindagem *soft armour*.

Os coletes de proteção balística do Exército Brasileiro, Figura 1, são dimensionados para o nível III sendo geralmente compostos por painéis *soft armour* nível III-A de materiais como tecidos de aramida ou compósitos a base de Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular (PEUAPM).



Figura 1 - Vista frontal do colete de proteção balística nível III-A fabricado pelo Exército
Fonte: O autor.

O modelo de colete visto na Figura 1 possui ainda um bolsão em sua capa destinado a acomodar placas de proteção balística em PEUAPM, Figura 2, as quais em conjunto com os painéis conferem ao colete o nível III (BRASIL, 2016).



Figura 2 - Vista frontal da placa balística utilizada no colete do Exército Brasileiro
Fonte: O autor.

2.2. Kevlar®

Os subitens a seguir tratam de diferentes aspectos acerca do Kevlar®, iniciando com conceitos acerca do polímero que o define, a aramida, passando pelos, agentes de envelhecimento, propriedades das fibras e tecidos e por fim propriedades balísticas.

2.2.1. Aramida

Kevlar® é o nome comercial da fibra polimérica de para-aramida fabricada pela *Du Pont* desde a década de 70. A poliaramida, ou simplesmente aramida, é um polímero sintético da família das poliamidas aromáticas cuja nomenclatura IUPAC é poli (p-fenileno tereftalamida). Yang (1993) pontua que a diferença da aramida das outras poliamidas aromáticas é sua cadeia principal em que pelo menos 85% dos grupos amida está ligado diretamente a dois anéis aromáticos. As macromoléculas apresentam configuração *trans*, naturalmente estendidas e

com formação de pontes de hidrogênio intermoleculares conforme pode ser observado na Figura 3.

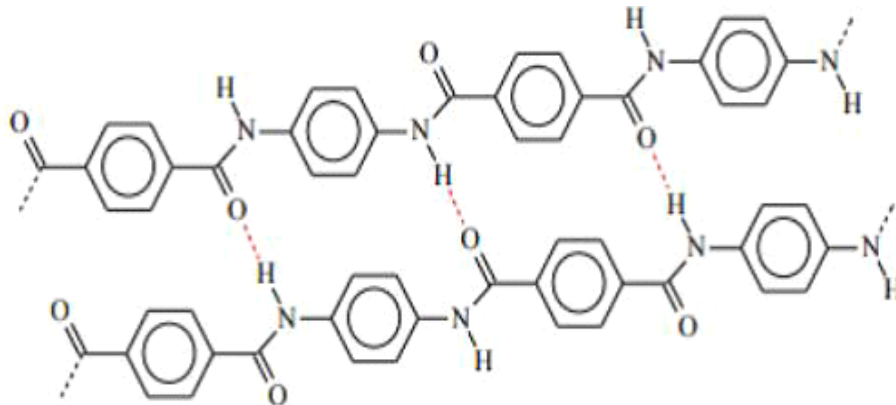


Figura 3 - Configuração das macromoléculas da poliaramida

Fonte: DU PONT, 2010

O advento da poliaramida é atribuído a experimentos visando a produção de polímeros com cadeia linear estendida utilizando o polímero poli-p-benzamida em soluções cristalinas. As macromoléculas de poliaramida distribuem-se radialmente em forma bastões, originando fibras (YANG, 1993), conforme pode ser visto na Figura 4.

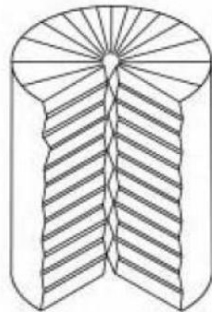


Figura 4 - Pregas radiais da fibra de poliaramida

Fonte: BHATNAGAR, 2006

A síntese de obtenção da aramida geralmente consiste da reação de diaminas aromáticas com diácidos aromáticos, sendo a que a reação mais comum é a condensação entre o p-fenileno diamina (PPD) e o dicloreto de tereftaloíla (TCI) em um solvente amida (WIEBECK, HARADA, 2005), conforme exposto na Figura 5.

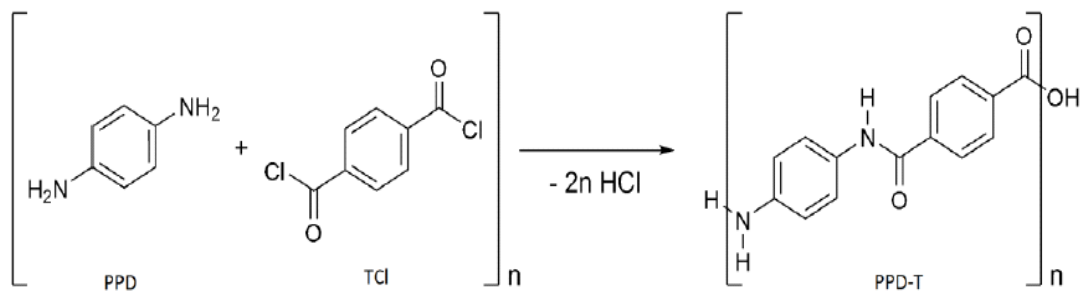


Figura 5 - Síntese da poliaramida por condensação entre PPD e TCl

Fonte: YANG, 1993

Os dois compostos resultantes do processo de síntese podem ser divididos em:

- Meta-aramida: as ligações entre os grupos e os anéis aromáticos ocorrem nas posições 1 e 3, conforme Figura 6 (a).
- Para-aramida: as ligações entre os grupos e os anéis aromáticos ocorrem nas posições 1 e 4, conforme Figura 6 (b).

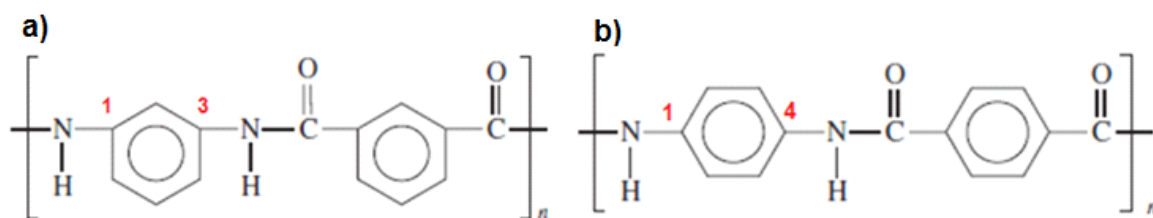


Figura 6 - (a). Mero da meta-aramida e (b) mero da para-aramida

Fonte: adaptado de HEARLE, 2001

A poliaramida é um polímero termofixo, sendo que suas temperaturas de transição são geralmente superiores quando comparadas a outros polímeros devido ao empilhamento favorável entre os anéis aromáticos das macromoléculas e a presença de pontes de hidrogênio intermoleculares. É considerado um polímero infusível devido ao início da decomposição ocorrer antes da fusão. A quebra das ligações simples inicia aproximadamente a 510 °C, que é seguida dos anéis aromáticos em temperaturas próximas a 525 °C, sendo a completa degradação no patamar de 575 °C. A temperatura de transição vítrea

(T_g) da aramida é de aproximadamente 375° C (YANG, 1993; BOUKAVALAS, WIEBECK, 2007).

A aramida por ser um polímero semi-cristalino, com cristalinidade superior a 50% (BITTENCOURT, 2011), possui estrutura cristalina a qual pode ser verificada por meio de ensaios de difração de raios-X. A célula unitária está representada na Figura 7.

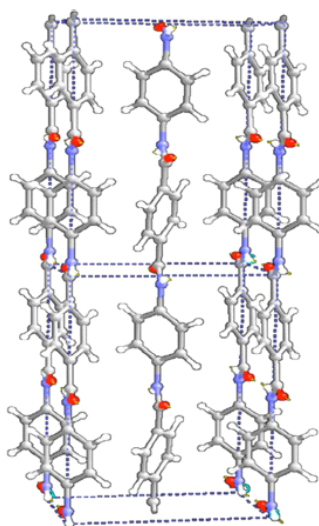


Figura 7 - Representação da estrutura cristalina da aramida

Fonte: NASCIMENTO, 2014

A estrutura cristalina do polímero normalmente é classificada como monoclinica. Contudo pode ser classificada também como pseudo-ortorrômbica por seu ângulo de célula unitária γ aproximar-se de 90°. Os parâmetros de rede, bem como os ângulos da célula unitária são representados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de rede cristalina da aramida

Fonte: YANG, 1993; DOWNING, NEWELL, 2004

Parâmetros	Valores
a (Å)	7,80
b (Å)	5,19
c (Å)	12,9
α (graus)	90
β (graus)	90
γ (graus)	≈ 90
Número de meros por célula unitária	2

2.2.2. Agentes de envelhecimento

A degradação da aramida ocorre por umidade e absorção de radiação. A aramida é um polímero higroscópico, sendo que a absorção de água provoca inchaço nas fibras e problemas de aderência em longo prazo (YANG, 1993). A hidrólise do polímero dá-se por reação do grupo amida resultando em produtos como ácido carboxílico e amina (DEROMBISE *et al*, 2010). O mecanismo de hidrólise da poliaramida está representado na Figura 8.

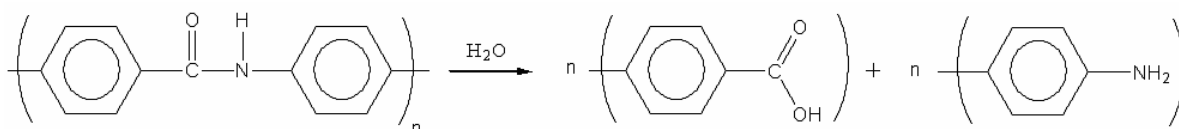


Figura 8 - Reação de hidrólise da aramida

Fonte: adaptado de DEROMBISE *et al*, 2010

Os processos poliméricos de absorção de radiação e degradação fotoquímica são quantizados. A intensidade de energia proveniente da onda de radiação incidente é igual ao produto da constante de Planck pela frequência da radiação incidente. Existindo uma energia de ligação característica para todas as ligações químicas, é possível correlacionar esta energia com um comprimento de onda (AZEVEDO, 2009). Existindo assim, um comprimento de onda crítico o qual poderá causar quebra das ligações conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Energias de ligação e os comprimentos de onda associados

Fonte: adaptado de AZEVEDO, 2009

Ligação Química	Energia de Ligação (Kcal/mol)	Comprimento de onda (nm) equivalente
O-H	111	259
C-C	36	345
C=C	610-630	195-189
C=O	100	286
C-H	99	290
N-H	93	306
C-O	84	340
C-N	70	410

A radiação UV geralmente causa dano à aramida com maior intensidade na superfície da fibra, ocorrendo oxidação de grupos terminais e cisão das cadeias entre os grupos amida (ZHANG *et al*, 2006). O amarelo ouro característico cede lugar a uma coloração mais escura ocorrendo ainda perda de desempenho mecânico (DU PONT, 2010). A perda de desempenho mecânico pode ser observada na Figura 9.

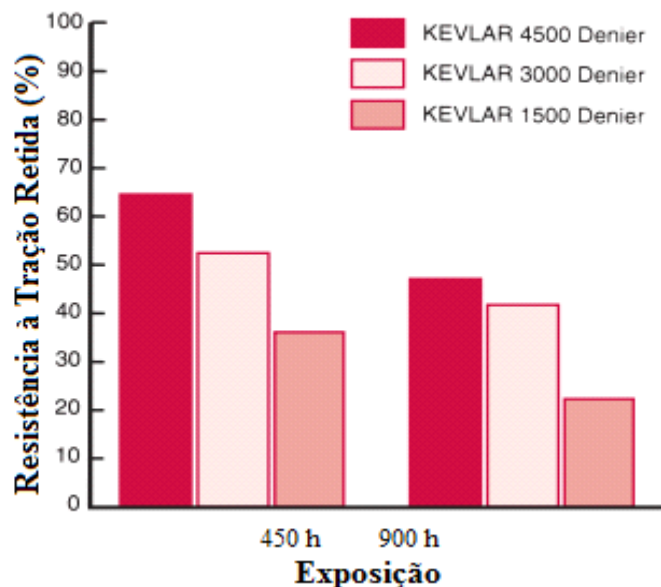


Figura 9 - Queda na Resistência à tração por exposição à radiação Ultravioleta

Fonte: adaptado de DU PONT, 2010

2.2.3. Propriedades das fibras e tecidos

As fibras Kevlar® possuem diferentes propriedades físicas, variando conforme parâmetros de processo de fabricação. De modo geral, cadeias enrijecidas oferecem maior resistência mecânica e menor alongamento (VALENÇA, 2014). As propriedades das diferentes famílias de Kevlar estão dispostas na Tabela 4.

Mesmo as fibras de uma mesma denominação comercial podem apresentar diferentes titulações, dependendo de suas aplicações, sendo usualmente utilizado o sistema de titulação direto para classificar as diferentes fibras. O sistema direto indica a massa associada a um comprimento padronizado. As duas unidades principais são: Tex (dtex): representa a massa em gramas para

1000 metros de fio e Denier (den): representa a massa em grama para 9000 metros de fio (LAWRENCE, 2003).

Tabela 4 - Propriedades das fibras comerciais de Kevlar®

Fonte: adaptada de YANG, 1993; HAZELL, 2015

Denominação	Densidade (g/cm ³)	Tenacidade (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Kevlar® 29	1,43	2,9	70	3,6
Kevlar® 49	1,45	2,9	135	2,8
Kevlar® 119	1,44	3,1	55	4,4
Kevlar® 129	1,45	3,4	99	3,3
Kevlar® 149	1,47	2,3	143	1,5
Kevlar® KM 2	1,44	3,9	83	4,3

As fibras de Kevlar® geralmente possuem três tipos de comportamento quando levadas à ruptura por tração (YANG, 1993; VALENÇA, 2014), podendo ocorrer outros tipos de ruptura por compressão transversal (LIM *et al*, 2011). Os tipos de ruptura à tração podem ser divididos em:

- Ruptura Pontual: normalmente está associada à redução gradual da seção transversal da fibra na direção do ponto de ruptura, ocorrendo estrição da mesma até a fratura;
- Ruptura Fibrilada: geralmente ocorre redução abrupta no diâmetro da fibra;
- Ruptura de região com defeito: caracterizada por alterar pouco o diâmetro da fibra, sendo observado plano de cisalhamento preferencial em pontos já fragilizados ou mesmo descontínuos na fibra.

As fibras organizam-se em fios, que por sua vez são utilizadas na fabricação de tecidos (BEHERA; HARI, 2010). Os tecidos podem ser classificados como: tecido plano, tecido de malha e tecido não-tecido (ARAÚJO, CASTRO, 1986).

Os tecidos planos resultam do entrelaçamento de fios, conforme Figura 10, denominados de trama, que são os fios menos tensionados cuja orientação dá-se no sentido horizontal, e urdume, que são fios mais tensionados e de orientação vertical (COOK, 1984).

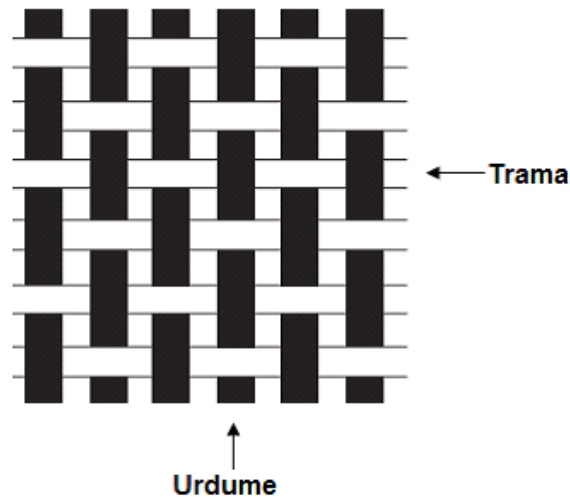


Figura 10 - Entrelaçamento entre fios de trama e urdume no tecido plano

Fonte: BEHERA; HARI, 2010

John e Thomas (2008) classificam os tecidos planos de acordo com seu entrelaçamento em:

- Simples: cada fibra do urdume passa simetricamente e alternadamente por baixo e por cima de cada fibra de trama (Figura 11 (a)).
- Sarja: uma ou mais fibras do urdume passam repetidamente e alternadamente por cima e em duas ou mais fibras da trama (Figura 11 (b)).
- Cetim: possui a mesma configuração de trama e urdume da sarja, porém com número de intersecções reduzidas (Figura 11 (c)).
- Cesta: duas ou mais fibras do urdume entrelaçam duas ou mais fibras da trama (Figura 11 (d)).

Os tecidos de malha são fabricados por meio do entrelaçamento com agulhas em que filamentos interpenetram uns nos outros (SCOTT, 2005; ARAÚJO; CASTRO, 1986). Os tecidos de malha não tem relevante aplicação como materiais de proteção balística por não possuírem estabilidade dimensional adequada para tal aplicação sendo que seu processo de tecelagem pode ocasionar fragilização das fibras (NASCIMENTO, 2015).

Um outro tipo de tecido são os multiaxiais, construídos a partir de duas ou mais camadas de fibras em direção única, sendo empilhados em direções com ângulos de interesse e então unidas por fios de costura mais finos. Proporcionam boa molhabilidade e resistência à propagação de danos pelo tecido (OWENS CORNING, 2014). Podem ser classificados como biaxiais, triaxiais, quadraaxiais

(OWENS CORNING, 2014, KONG, MOURITZ, PATON ,2004, BIBO, HOGG, 1996).

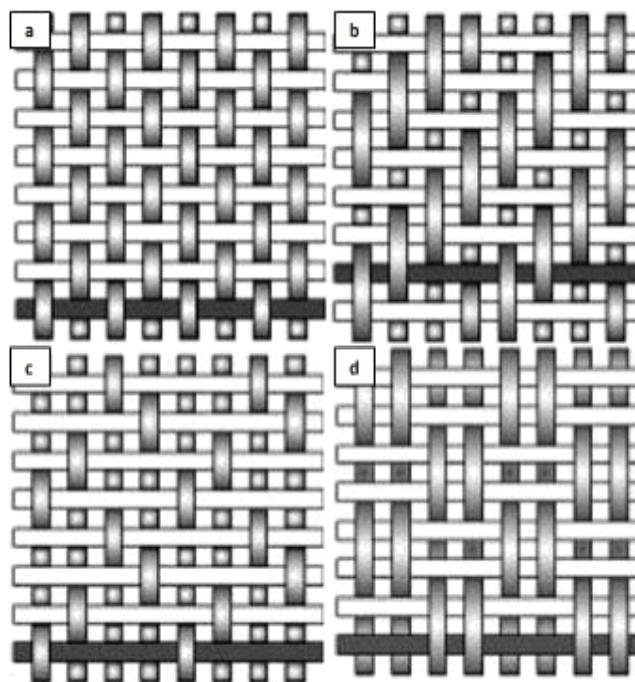


Figura 11 - Configuração de entrelaçamento (a) simples, (b) sarja, (c) cetim e (d) cesta

Fonte: ARAÚJO, 2015

Os não tecidos são construídos por orientação mecânica de um véu ou manta de fibras interligadas. São constituídos por sucessivas camadas de filamentos unidirecionais contínuos colimados segundo um ângulo específico em cada camada, sendo aplicada resina termoplástica para adesão entre camadas (BHATNAGAR, 2006). Os tecidos utilizados com aplicações balísticas podem apresentar diferentes respostas aos impactos de projetis dependendo do tipo de entrelaçamento do tecido e das propriedades do seu fio, como por exemplo a titulação, sendo que geralmente **fios mais leves dissipam mais energia** (BHATNAGAR, 2006).

O Kevlar® XP S103 é um tecido da Du Pont à base do fio KM2 *plus* de 1000 *denier* tipo multiaxial, cuja orientação de entrelaçamento é $\pm 45^\circ$ (biaxial) e que possui aplicação em coletes de proteção balística. O Material é da última geração das famílias de Kevlar®, com vantagens na sua aplicação como redução de traumas ao usuário além de economia de até 10% em massa em relação às

famílias anteriores (DU PONT, 2013). Suas características estão expressas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades do tecido de Kevlar® XP S103

Fonte: (DU PONT, 2013)

Propriedade	Valor
Largura do rolo (mm)	1610±10
Espessura (mm)	0,46±0,03
Comprimento por rolo (m)	100
Gramatura (g/m ²)	510±20

Tecidos como o Kevlar® XP S103 são matérias-primas básicas de blindagens de uso militar e forças auxiliares. A blindagem de proteção individual (colete de proteção balística) tem duas finalidades principais (GOPINATH, ZHENG, BATRA, 2012):

- Impedir a perfuração do projétil;
- Reduzir a energia resultante do impacto balístico, ou seja, da onda de choque transmita pela blindagem.

2.2.4. Propriedades balísticas das fibras e tecidos

Sendo assim, o desempenho balístico de um material é aferido pela eficiência em absorver e dissipar energia proveniente do impacto balístico, influenciando nesse quesito, propriedades como tenacidade, deformação até à ruptura das fibras e velocidade da onda de tensão pelo tecido (JACOBS, DINGENEN, 2001). Além disso, a estrutura do tecido, como tipo de entrelaçamento e número de filamentos por fio, também influencia no desempenho balístico deste tipo de blindagem (AFSHARI, *et al*, 2012).

Cuniff (1999), em pesquisas com diferentes tipos de fibras e tecidos, definiu a seção reta do projétil impactante, a massa do projétil, a gramatura do tecido vezes o número de lâminas que compõe a blindagem como principais parâmetros no desempenho de blindagens à base de tecido, evidenciando a influência desse parâmetro na análise em questão. Cuniff propôs uma relação

que pode ser utilizada para comparar fibras com propriedades mecânicas distintas, conforme Equação 1.

$$U^* = \frac{\sigma_r \varepsilon_r}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Sendo σ_r a tensão até ruptura da fibra, ε_r a elongação até ruptura da fibra, ρ : massa específica da fibra, E o módulo de elasticidade da fibra. Quanto maior o valor de U^* melhor será a dissipação de energia (CUNIFF, 1999).

Dessa forma, o desempenho balístico é influenciado pelas propriedades mecânicas dos fios: tensão máxima da fibra, elongação até a ruptura, massa específica da fibra, módulo de elasticidade da fibra, título da fibra, tenacidade à fratura, além da construção do tecido, sua trama e urdidura, e gramatura. Por fim, propriedades da munição como massa e geometria além da forma de adesão entre as lâminas de tecido também devem ser computadas afim de estudar o desempenho balístico de uma blindagem (AFSHARI, *et al*, 2012; CUNIFF, 1999; JACOBS, DINGENEN, 2001, SOHAIMI, *et al*, 2016).

2.3. Poliuretana

Poliuretanas são polímeros constituídos por monômeros uretanos resultantes da reação de compostos hidroxilados com isocianatos (CLARO NETO, 1997), a reação de síntese pode ser representada conforme Figura 12.

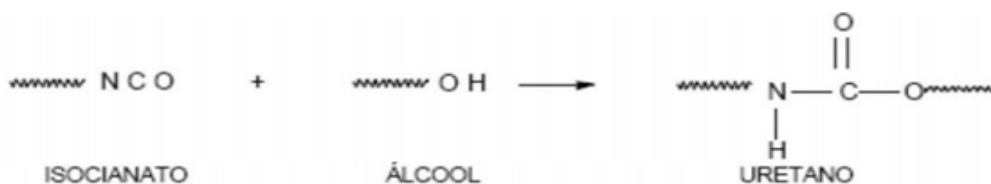


Figura 12 - Reação entre grupo hidroxilado e isocianato para formação de grupo uretano

Fonte: LIMA, 2001

Um dos métodos de obtenção de poliuretanas é por meio de pré-polímero: inicialmente polimeriza-se com um polioliol, ocorrendo aumento de massa do composto intermediário, para que então os isocianatos ainda livres possam reagir com outras moléculas de polioliol (PLEPIS, 1991). Os polióis podem ter diferentes origens: óleos vegetais como soja, canola, milho, palma e mamona,

além do petróleo (NAKAI, *et al*, 2003). O óleo de mamona é classificado como poliol poliéster natural de funcionalidade 3, estando presente em 89% da sua composição o ácido ricinoleico (CLARO NETO, 1997), este composto pode ser observado na Figura 13.

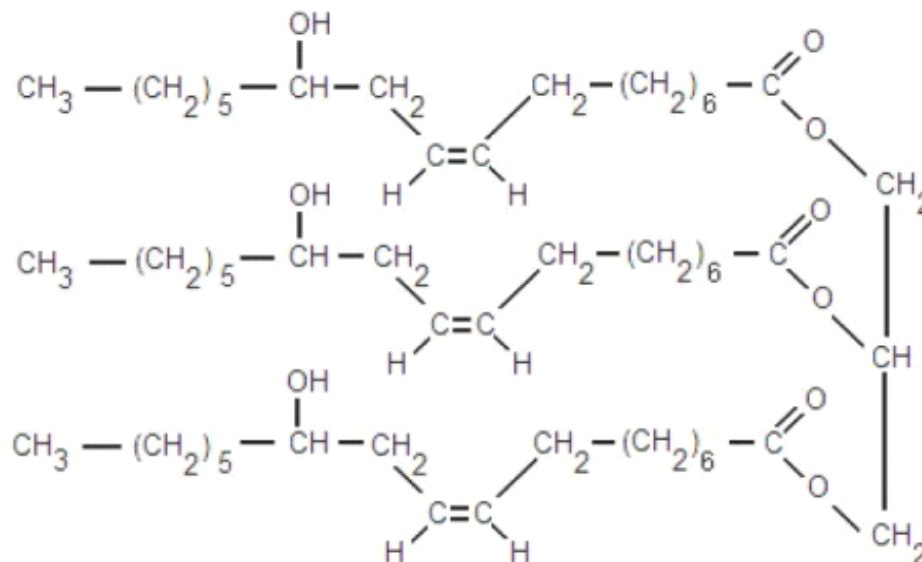


Figura 13 - Representação da molécula do ácido ricinoleico

Fonte: AZEVEDO, 2009

A poliuretana possui especial interesse pois tais materiais não exalam produtos orgânicos, sua matéria-prima não é utilizada como alimento e provém de fonte renovável, são biodegradáveis e resistentes à umidade (AZEVEDO, 2009, CANGEMI, 2010, ANAGREH, 2008), propriedades de interesse visando a proteção e garantia de desempenho da aramida utilizada na fabricação de coletes. A Tabela 6 apresenta as propriedades mecânicas do composto.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da poliuretana

Fonte: adaptado de AZEVEDO, 2009

PROPRIEDADE	VALOR
Densidade	1,09 (±0,03) g/m ³
Dureza Shore	70,00 (±0,07) D
Módulo de Elasticidade	2,0 Mpa (400 mN)
Rugosidade	12 nm
Módulo de Compressão	377 MPa
Módulo de estiramento	38 MPa
Temperatura Transição Vítrea	60°C

2.4. Comportamento balístico de blindagens à base de tecidos

Justo (2005) definiu os modelos de análise de desempenho de blindagens como segue:

- Aproximados analiticamente: são desenvolvidos modelos matemáticos resultantes de hipóteses simplificadas em que são abordados os diferentes fenômenos através de equações diferenciais ou integrais de energia e momento.
- Empíricos: são propostos modelos derivados de um grande número de observações experimentais abordando fenômenos específicos.
- Numéricos: são feitas modelagens por meio de técnicas de elementos finitos.

Nesse trabalho serão enfocados os modelos aproximados analiticamente e o modelos empíricos.

2.4.1. Teoria de Grigoryan, Kobylki e Bespalov (2009)

Uma forma de estudar fenômenos balísticos em tecidos, do tipo aproximado analiticamente, foi proposta por Grigoryan, Kobylki e Bespalov (2009). Neste caso, é estimada a velocidade mínima para perfuração de um alvo, v_{th} (*threshold velocity*). Considera-se apenas o estágio de deformação elástica dos fios do tecido, dessas condições, o equacionamento do balanço de energia cinética oriunda do projétil resulta na Equação 2.

$$\frac{(m_p + M_A)v_i^2}{2} = \frac{E\varepsilon_r M_D}{2\rho} \quad (2)$$

Donde m_p é a massa do projétil, M_A a massa de tecido adjunta ao impacto do projétil, v_i a velocidade incidente do projétil, E o módulo elástico do fio, ε_r o alongamento até a ruptura do fio, M_D a massa de tecido deformada e ρ a massa específica da fibra. A massa de tecido deformada é escrita de acordo com a Equação 3.

$$M_D = 4\beta d c_e t_p A_d \quad (3)$$

Sendo β uma constante relativa ao aumento de área do tecido impactado em comparação com a área de seção transversal do projétil, d o diâmetro do penetrador, c_e a velocidade da frente de onda nas fibras equivalentes, t_p o tempo de perfuração do penetrador, e A_d a gramatura do sistema. A velocidade da frente de onda nas fibras equivalentes nada mais é do que a velocidade de frente de onda, conforme a equação 4 (MEYERS, 1994) multiplicada por um fator α .

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

O tempo de perfuração do projétil é equacionado como a razão entre a deflexão máxima alcançada no limiar de perfuração da blindagem (assumida como o produto do alongamento até a ruptura do fio pelo calibre do projétil por uma constante γ referente à construção do tecido), relacionada com a absorção da energia cinética do projétil na deformação elástica de alongamento de fio, pela velocidade inicial do projétil. Ainda, deve-se levar em conta a fração de massa do laminado têxtil abaixo do penetrador, dada conforme equação 5.

$$X = \frac{\pi(fd)^2 A_d}{4m_p} \quad (5)$$

Sendo f um fator relacionado ao diâmetro do projétil de forma a levar em conta a deformação do penetrador. Substituindo as equações 3, 4 e 5 na equação 2, utilizando a aproximação $\sqrt[3]{1 + \beta X} \cong 1$ e a velocidade mínima de perfuração define-se analiticamente conforme a equação 6.

$$v_{th} = Kc\epsilon_r \sqrt[3]{\frac{(fd)^2 A_d}{m_p}} \quad (6)$$

Onde K uma constante referente à construção do tecido balístico, sendo $K = \sqrt[3]{4\sigma\beta\gamma}$. Grigoryan, Kobylki e Bepalov multiplicam essa constante por um fator de 0,95 caso o material suporte seja a plastilina

2.4.2. Método de Naik *et al* (2013)

Naik, *et al* (2013) desenvolveram um método analítico válido para uma gama de alvos compósitos de espessuras diferentes, baseado em balanço de energias e propagação das ondas de tensão, considerando ainda rasgamento (*shear plugging*) e falha por tensão durante a formação de cone na face contrária ao impacto.

A balística de efeitos inicia-se quando um projétil de alta velocidade atinge transversalmente um alvo, sendo inicialmente geradas ondas de esforços de compressão longitudinal e de cisalhamento na direção da espessura além de ondas de tensão e cisalhamento longitudinais no plano do alvo. Neste evento, criam-se duas regiões distintas, conforme a Figura 14, a região 1 que se delimita pela projeção da seção transversal do projétil no plano do alvo e a região 2 que se estende até a área percorrida pela onda de tensão transversal. Os fios chamados primários estão dispostos ao longo das direções do urdume e da trama. Os fios restantes, dispostos até a área limite compreendida pela Região 2 são designadas fios secundários.

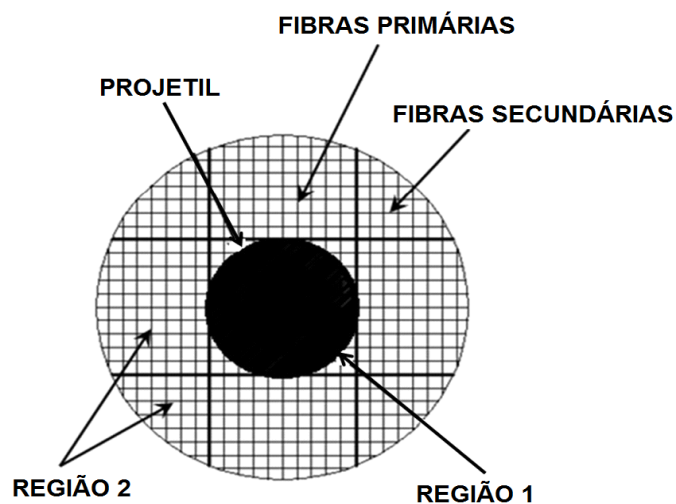


Figura 14 - Representação esquemática das regiões 1 e 2 e das fibras primárias e secundárias de um compósito à base de tecido

Fonte: adaptado de NAIK *et al*, 2013

O evento balístico foi modelado em três etapas: Na primeira ocorre o contato do projétil com a blindagem, como indicado na Figura 15 (a), e então as

ondas longitudinais de compressão e de cisalhamento viajam ao longo da direção da espessura. A área logo abaixo do projétil bem como a região circundante sofrem compressão, mostrada na Figura 15 (b), a compressão das camadas também produz esforços ao longo do plano na região circundante. Conforme a compressão e as ondas de cisalhamento percorrem a direção da espessura, as lâminas podem falhar por compressão, tração e cisalhamento com arrancamento de material (*shear plugging*) se o estiramento induzido à fibra superar o seu limite. A existência de vazios entre as camadas do laminado contribui com o efeito de dissipação de energia por delaminação (BHATNAGAR, 2006).

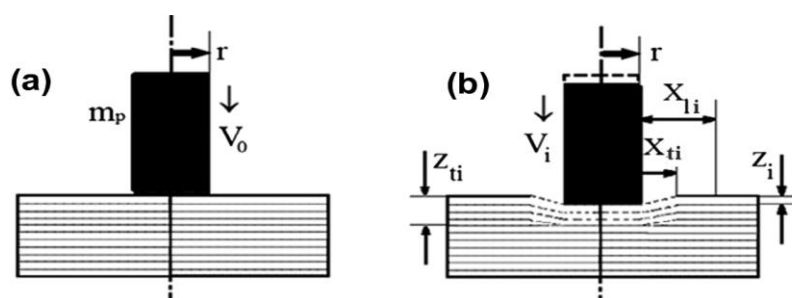


Figura 15 - (a) início do evento de impacto balístico e (b) início da compressão das camadas do laminado

Fonte: adaptado de NAIK *et al*, 2013

Lim *et al* (2011) observaram em Microscópio Eletrônico de Varredura o efeito de esforços de compressão transversal nas fibras de Kevlar® 129, apresentando diferentes respostas nos casos em que a compressão é quasi-estática, a altas taxas de deformação, estes feitos são observados na Figura 16.

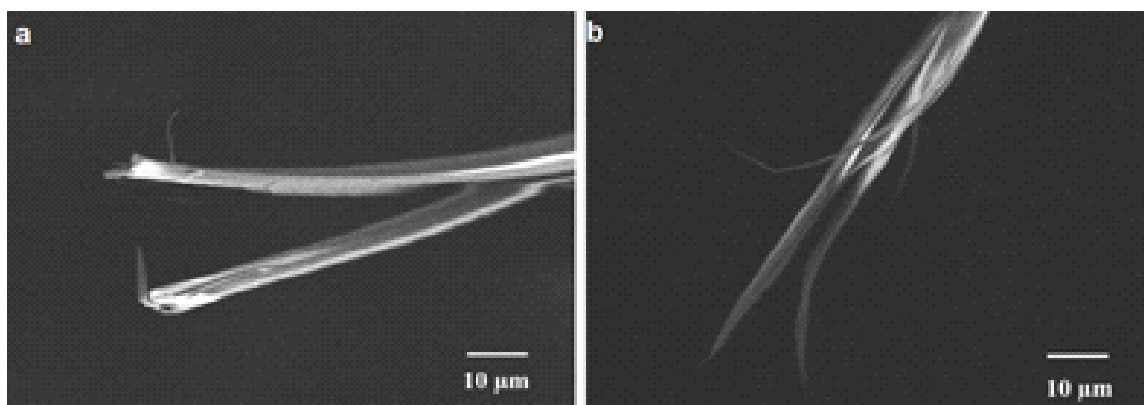


Figura 16 - (a) falha quasi-estática da fibra de Kevlar® por esforço de compressão transversal e (b) falha a altas taxas de deformação da fibra de Kevlar® por esforço de compressão transversal

Fonte: adaptado de LIM *et al*, 2011

A Figura 17 mostra uma análise de fratura por MEV em que ocorreu deformação da fibra de Kevlar® 129 por compressão imperfeita, demonstrando deformação não simétrica com a presença de amassamento da fibra (LIM *et al*, 2011).

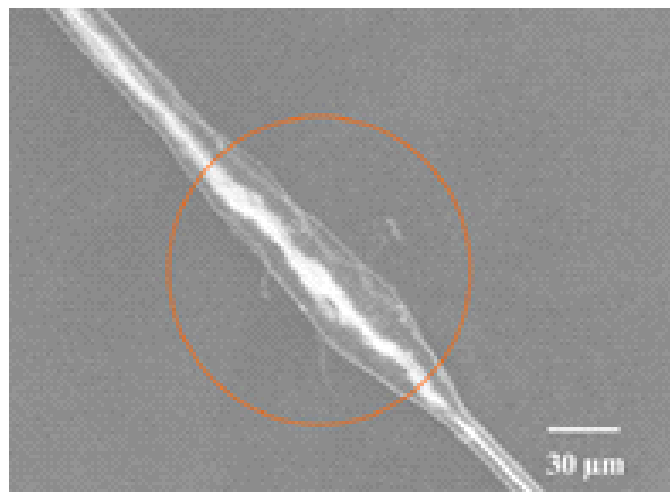


Figura 17 - Deformação por compressão imperfeita da fibra de Kevlar®

Fonte: adaptado de LIM *et al*, 2011

A segunda fase inicia-se quando a onda de cisalhamento atinge a face do alvo contrária ao impacto, vide Figura 18 (a). Dependendo do número de camadas que sofreram falhas mecânicas, que por sua vez dependem da velocidade de impacto do projétil e da espessura do laminado, e da energia remanescente no projétil, inicia-se a deformação cônica na face do alvo contrária ao impacto (MORYE, 2000, NAIK *et al*, 2004, NAIK, SHRIRAO, 2005), mostrada na Figura 18 (b).

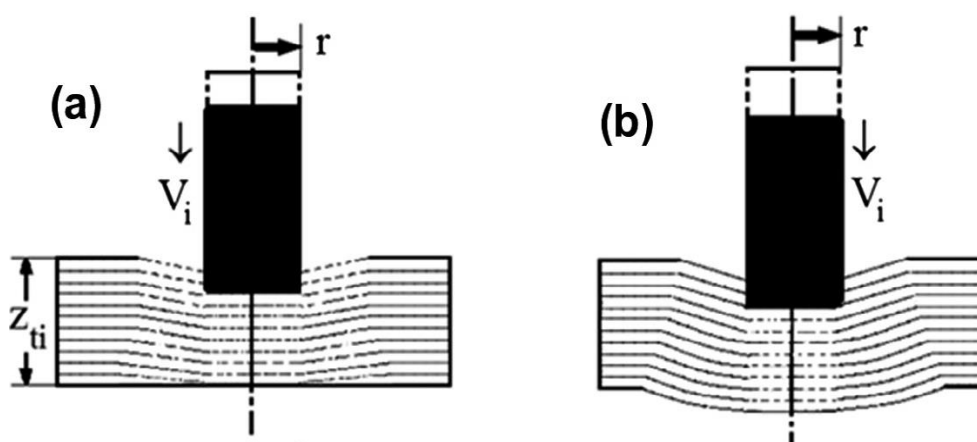


Figura 18- (a) a onda de cisalhamento atingindo a traseira do alvo e (b) formação da deformação cônica

Fonte: adaptado de NAIK, *et al*, 2013

As camadas que não falham no fim da fase 1 e início da fase 2 sofrem tração produzida pelo aumento do comprimento durante a deformação cônica e podem vir a falhar quando o estiramento induzido excede o limite de ruptura. A fase 2 termina quando ocorrem todos os mecanismos de falha mecânica do material, seja por estiramento ou cisalhamento arrancando material (*shear plugging*).

No terceiro estágio ocorre dissipação de energia por atrito e finaliza-se quando a ponta do projétil atinge a face posterior do alvo, conforme Figura 19. Nesta fase, se ainda existir alguma energia cinética residual no projétil, este perfurará completamente o alvo saindo com velocidade residual.

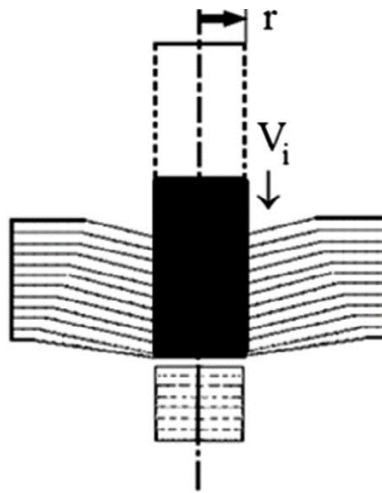


Figura 19 - Final do terceiro estágio, o projétil alcança a face oposta do alvo

Fonte: adaptado de NAIK, *et al*, 2013

2.4.3. Comportamento das frentes de onda

Os fenômenos acerca do comportamento dinâmico de um material quando impactado e sujeito a grandes taxas de deformação, foram descritos por Meyers (1994), de modo a descrever o fenômeno da propagação das ondas de choque geradas pelo impacto do projétil. A resposta como onda de choque depende do nível de tensão à que o material é submetido, sendo ainda possível que a resposta ao impacto resulte em ondas elásticas ou plásticas (CARDOSO, 2005).

Classifica-se uma onda como elástica quando as tensões submetidas ao material são menores que a tensão de escoamento do mesmo. A velocidade da onda elástica é determinada pela equação 4. Já quando o pulso de tensão

supera a tensão de escoamento do material pode ocorrer a geração de uma onda elástica e uma onda plástica. A onda de choque ocorre quando o pulso de tensão torna-se muito maior que a tensão de escoamento, de modo que o material passa comportar-se como um fluido e as ondas associadas passam a propagar em frente única com velocidade maior que a da onda elástica.

A propagação da onda de choque em diferentes meios é essencial para o entendimento dos fenômenos balísticos em curso. Quando ocorre a mudança de meio pela frente de onda também são alteradas propriedades do meio como: pressão, velocidade da onda e densidade. A impedância de choque é definida como o produto da densidade inicial do meio pela velocidade da onda de choque, sendo que, para fins práticos, é possível aproximar pelo produto da densidade inicial pela velocidade sônica da onda (MEYERS, 1994). De modo geral, quando ocorre transmissão por interface, considerando velocidade e pressões iguais na região limítrofe entre os dois meios, de um meio de maior impedância ao choque (maior densidade) para outro meio de menor impedância, gera-se uma onda compressiva transmitida, com menor intensidade de energia, atenuando dessa forma a frente de onda (DA SILVA, 2014).

2.4.4. Limites balísticos

As soluções analíticas dos fenômenos descritos anteriormente acabam sendo bastante trabalhosas tendo em vista o número de variáveis e aproximações que devem ser consideradas. Formulações empíricas podem apresentar formas mais diretas de dimensionar blindagens. Essas soluções procuram prever o limite balístico (V_{50}) de uma blindagem. Segundo a MILITAR STANDARD-662F o V_{50} é a máxima velocidade com a qual é possível impactar um projétil em uma blindagem com a probabilidade de 50% de resultar em perfuração completa ou parcial (U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 1997).

O limite balístico está intimamente ligado com a espessura da blindagem, sendo que o aumento desta também causa aumento no limite balístico (SONG, EGGLESTONE, 1987; GUOQI; GOLDSMITH, DHARAN, 1992; HSIEH, *et al*, 1990). Segal (1992) verificou em seus experimentos que o limite balístico é proporcional à espessura do alvo, já Hsieh (1990) chegou à conclusão que V_{50}^2 e a espessura da blindagem seriam diretamente proporcionais.

No entanto, outros pesquisadores chegaram à conclusão de que para que V_{50}^2 seja diretamente proporcional à espessura, esta deve estar elevada a um expoente que pode variar de 0,74 a 0,80. Song e Egglestone (1987) chegaram à seguinte relação entre limite balístico e a gramatura da blindagem (A_d) em sistemas laminados com tecidos, conforme pode ser verificado na Equação 7.

$$V_{50} = \theta(A_d)^\delta \quad (7)$$

De modo a considerar os efeitos da matriz aplicada a um tecido balístico pode-se considerar a equação proposta por Walker (2001), que considera limite balístico, a fração de massa da resina (r) empregada na blindagem, a constante β , que representa o aumento de área do tecido impactado em comparação com a área de seção transversal do projétil e uma relação (\bar{X}) entre área de seção de um projétil vezes a gramatura da blindagem, dividida pela massa do projétil (m_p). O tratamento matemático está representado na Equação 8.

$$V_{50}(\bar{X}, r) = \sqrt{1 - r + (\beta\bar{X})^3} V_{50}(\bar{X}, 0) \quad (8)$$

É importante ressaltar que os equacionamentos e fenômenos descritos anteriormente têm sua aplicabilidade em condições de alvos sem influência de agentes de degradação. Em seus estudos, Bazhenov (1997) alertava para a perda de desempenho balístico de blindagens à base de aramida pela mudança de atrito entre as lâminas de tecido e o projétil pela presença de água ocasionando o deslizamento do tecido por ocasião do impacto balístico. Li *et al* (2016) verificaram que alvos fabricados com tecidos de aramida sem tratamento hidrorrepelente podem sofrer redução em mais de 50% de seu limite balístico quando imersos em água, como pode ser visto na Figura 20.

Foram testados alvos quadrados, 400 mm x 400 mm, imersos em água por 24 horas, com 24 e 31 camadas de tecido TH6108 da Tayho (China) de gramatura 0,21 kg/m² para ensaios de medição de limite balístico com munição 9 mm FMJ e 7,62x51 mm, respectivamente. Os resultados dos impactos com projéteis 9 mm FMJ e 7,62x51 mm estão dispostos na Figura 20.

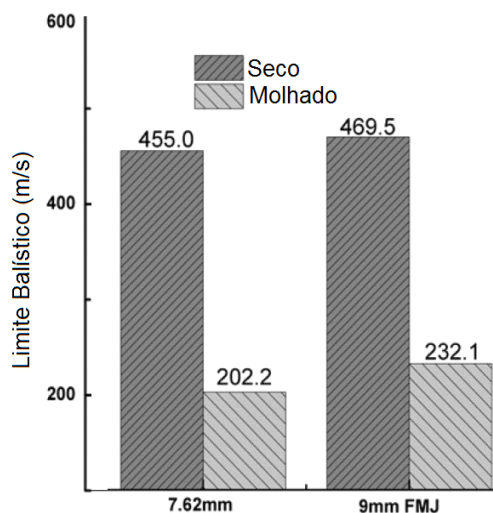


Figura 20 - Comparação dos limites balísticos para amostras secas e imersas em água

Fonte: adaptado de LI *et al*, 2016

2.4.5. Traumas balísticos

Muito embora dimensionar uma blindagem com base no seu limite balístico gere segurança no tocante à perfuração de um determinado projétil, ainda há que se considerar os efeitos do trauma resultante da transferência do impacto do projétil ao corpo do usuário e que podem causar sérios danos aos tecidos e órgãos do tórax ou abdome do usuário (CANNON, 2001).

A *National Institute of Justice Standard 0101.04* fixa como 44 mm a máxima indentação em plastilina que uma face de colete presa ao recipiente com a massa pode apresentar em ensaio, para qualquer nível de ameaça, quando impactada por um projétil a distância de 5 m (níveis I ao III-A) ou a 15 m (níveis III e IV), considera-se esse um limite em que há 6% de letalidade ao usuário (HANLON, GILLICH, 2012).

Um meio aproximado analiticamente para estudo dos traumas balísticos relaciona-se ao trabalho de Prather, Swann e Hawkins (1977). O método em questão, utiliza a conservação de quantidade de movimento linear para deformação da blindagem, conforme segue na Equação 9.

$$V_e = \frac{m_p V_p}{M_b + m_p} \quad (9)$$

Sendo V_e a velocidade efetiva da blindagem, M_b a massa deformada da blindagem, m_p (g) e V_p (m/s) massa e velocidade do projétil, respectivamente. A massa deformada da blindagem (M_b) é considerada como o produto da gramatura da blindagem pela área média da cavidade formada na plastilina, referente ao impacto balístico. Ainda, considera-se uma zona de baixa letalidade, conforme Equação 10, em que as condições acima são inseridas.

$$\ln \frac{m_p V_p^2}{W^{\frac{1}{3}} D T} \leq 9,2 \quad (10)$$

Sendo W e T constantes relacionados ao corpo impactado. Rearranjando, chega-se por fim à Equação 11, a ser resolvida em D (cm), deformação do projétil/ diâmetro da cavidade formada pelo impacto balístico, sendo A_d a gramatura da blindagem.

$$D^3 + \frac{4 D m_p}{\pi A_d} - \frac{4 m_p^2 V_p^2}{W^{\frac{1}{3}} T e^{9,2} \pi A_d} = 0 \quad (11)$$

Da estimativa do diâmetro de cavidade pelo método acima, pode-se calcular o volume indentado na plastilina, caso seja conhecida a geometria dessa cavidade. Park *et al* (2012) determinaram a relação da profundidade da indentação na plastilina com a energia cinética dissipada, relacionando ainda retornar a energia cinética dissipada na massa, como observado na Figura 21. A Figura 21 converte o volume de cavidade na indentação na plastilina, de forma a estimar os valores resultantes dos impactos nas amostras e fornecer parâmetros para o dimensionamento de blindagens.

Para nortear parâmetros desse trabalho verificou-se que em experimentos com alvos quadrados de 305 mm x 305 mm, com 14 camadas de tecido de Kevlar® 29 (tecido 713) com costura multidirecional e gramatura da solução de 4,27 Kg/m², Kadir Bilisik e Turhan (2009) mediram indentações na plastilina de 31 mm, em ensaios com calibre 9 mm e velocidades médias de 353 m/s a seis metros.

Já Sohaimi *et al* (2016) mensuraram indentações médias de 35,5 mm utilizando 15 camadas de tecido de Kevlar® 802 F, gramatura da blindagem de 2,85 kg/m², em alvos quadrados de 254 x 254 mm. A adesão empregada assemelhou-se a uma forma empregada neste trabalho, costura perimetral com

fi de nylon. Os impactos seguiram o nível II da NIJ Standard 01008.01 empregando munição 9 mm.

As blindagens estudadas pelos pesquisadores citados enquadram-se ao nível II-A e II, respectivamente da NIJ Standard 0101.04 e NIJ 0108.01, não sendo possível avaliar com precisão se tais proteções estariam suficientemente dimensionadas ao nível II, para o alvo de Kadir Bilisik e Turhan (2009), e aos níveis II e III-A da NIJ 0101.04 para a blindagem utilizada por Sohaimi, *et al* (2016).

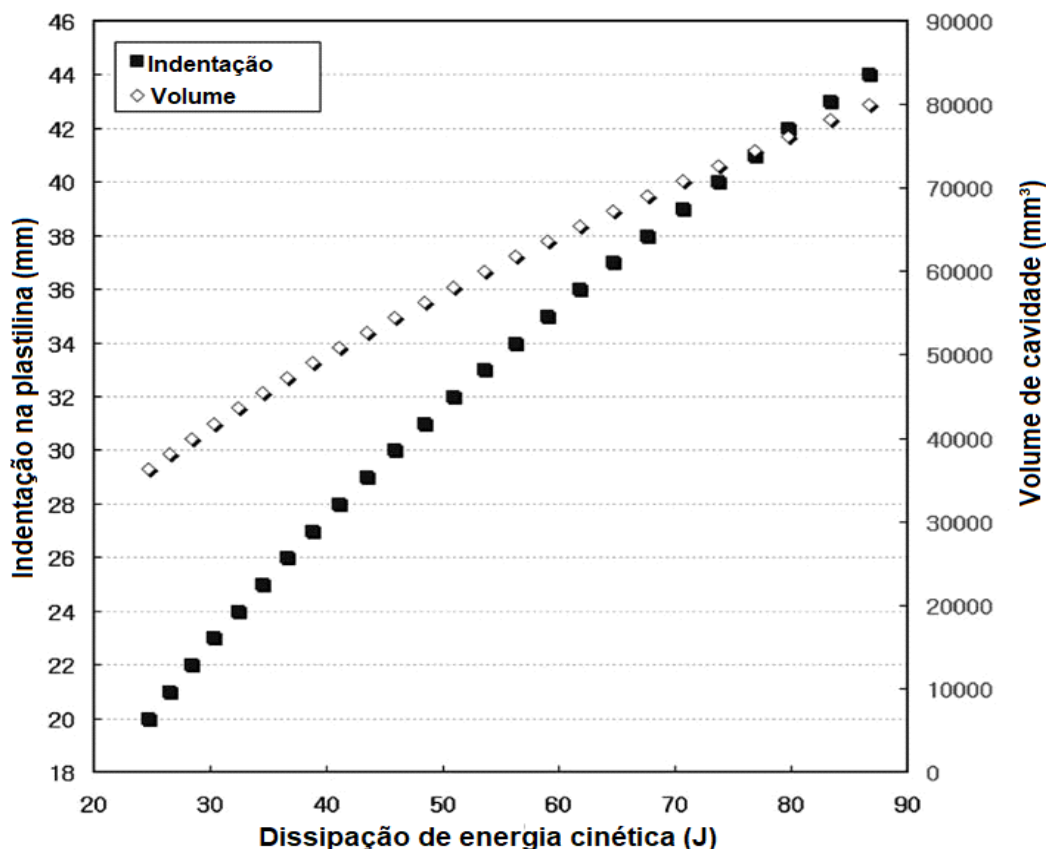


Figura 21 - Relação entre energia cinética dissipada, profundidade de indentação na plastilina e volume de cavidade para projetis 9 mm

Fonte: adaptado de PARK *et al*, 2012

2.5. Considerações finais

Da exposição feita neste capítulo extraem-se como oportunidade de pesquisa os fatores que influenciam o desempenho balísticos de blindagens à base de tecido, tais como o número de camadas que a compõe e seu estado de degradação por agentes de envelhecimento.

Quanto à questão do número de lâminas, este influencia diretamente na gramatura da solução balística, essencial para o entendimento dos fenômenos de impacto. Não se consegue extrair imediatamente da literatura, solução analítica aproximada ou mesmo empírica, acerca do dimensionamento de blindagens com tecidos como o utilizado nesta dissertação. Será proposta uma metodologia no capítulo 3 a fim de que se confirme como uma forma auxílio na resolução desse tipo de questão.

Aos agentes de envelhecimento tem-se a importância da aferição de quanto os invólucros utilizados no atual estado da arte são eficientes, ou mesmo o quanto o tecido propriamente dito perde desempenho por envelhecimento, e do tanto que uma nova proposta de proteção ao laminado balístico pode ser eficaz, bem como aumentar o desempenho balístico.

Segue-se que a proposta Kevlar® XP e PU é uma abordagem inédita e calca-se em aspectos de sustentabilidade e economicidade a possíveis métodos de fabricação futuros

Este trabalho visa contribuir no preenchimento dessas lacunas do conhecimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da metodologia do trabalho, apresentando o fluxograma das atividades, os materiais empregados e os métodos utilizados.

3.1. Fluxograma de trabalho

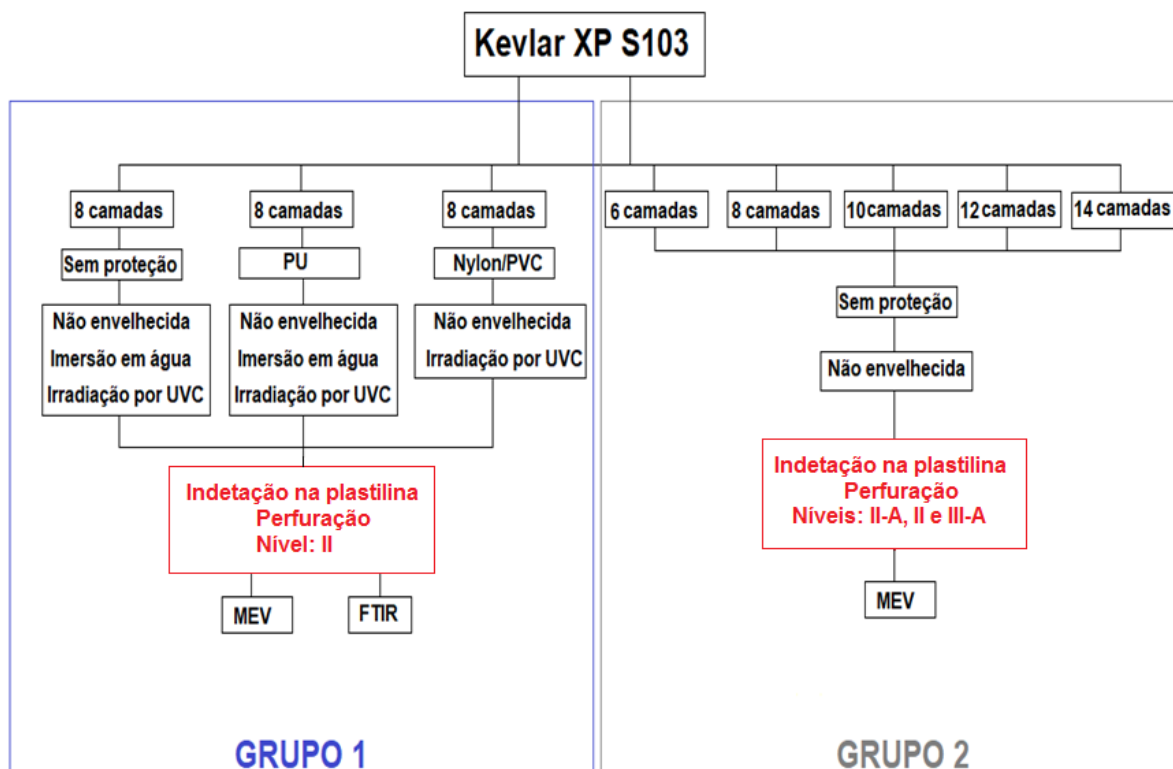


Figura 22 - Fluxograma dos métodos a serem executados no trabalho

3.2. Materiais

- Tecido de Kevlar® XP S103: doação pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar (material adquirido da Du Pont do Brasil S/A.)
- Poliuretana: doação pela empresa Cequil Central de Industrialização e Desenvolvimento de Polímeros Ltda.
- Plastilina marca CORFIX, massa específica 1,70 g/cm³, disponível nos laboratórios balísticos.
- Munição 9 mm Luger, fabricante Companhia Brasileira de Cartuchos: disponível nos laboratórios balísticos.
- Lâmpada de UVC Philips 15W – TUV, com pico de radiação a 253 nm.

- Fio de poliamida multifilamento torcido e retorcido 750/3 dtex, tecido de nylon emborrachado gramatura 70 g/m² e plástico cristal de policloreto de vinila espessura comercial 0,10 mm doados pelo Parque Regional de Manutenção da 5ª Região Militar.

3.3. Métodos

Neste item serão apresentados a metodologia de dimensionamento dos alvos os métodos para preparação dos alvos, como serão executados os ensaios balísticos e as condições de degradação de cada alvo, a caracterização por MEV e FTIR.

3.3.1. Metodologia de dimensionamento dos alvos

A segurança acerca da perfuração dos alvos foi dimensionada utilizando o mesmo encadeamento lógico inerente às Equações 2, 3, 4 e 5, modificando a geometria do caminho de frente de onda conforme o que dispõe a Figura 23. A velocidade da frente de onda nas fibras equivalentes foi calculada multiplicando por um fator $\sqrt{2}$ em relação ao equacionamento proposto pelos autores em questão.

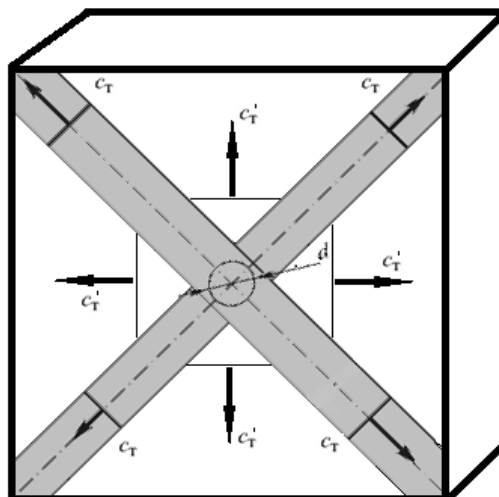


Figura 23 - Caminho da frente de onda no tecido de Kevlar® XP S103

Fonte: adaptado de GRIGORYAN, KOBYLKI e BESPALOV (2009)

Assim sendo, a velocidade da frente de onda nas fibras equivalentes ficou multiplicada por um fator $\sqrt{2}$. Tal condição deu origem à Equação 12, ou seja, a mesma Equação 6, multiplicada por $\sqrt[6]{2}$ e por 0.95, tendo em vista a utilização contumaz da plastilina como material base Às blindagens em os experimentos.

$$v_{th} = 1.07K_c \varepsilon_r^3 \sqrt{\frac{(fd)^2 A_d}{m_p}} \quad (12)$$

Por falta de dados, adotou-se o valor médio das constantes sugeridas por Grigoryan, Kobylki e Bepalov, ou seja, $K= 2,68$. Dessa forma, aplicando à Equação 12 este coeficiente, os dados fornecidos pelo fabricante acerca do Kevlar® KM2 plus ($E= 81,7$ GPa, $\varepsilon_r=3,85\%$, $\rho= 1440$ Kg/m³) os dados da munição conforme Tabela 1 ($m_p= 8,0$ g e $d= 9$ mm) e a gramatura da lâmina de Kevlar® XP S103 igual $0,51$ kg/m² (DU PONT, 2013), tem-se a estimativa do v_{th} para alvos com variação de número de lâminas: 6,8,10,12 e 14, conforme Tabela 7.

Tabela 7. Velocidade mínima de perfuração (v_{th}) estimada e confiabilidade ante ameaças de nível II,II-A e III-A da NIJ 0101.04

Número de camadas	Gramatura	V_{th} estimado (m/s)	Velocidade de segurança (m/s)	Confiabilidade
14	14	509	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Seguro
12	12	484	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Seguro
10	10	455	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Seguro
8	8	423	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Não-seguro
6	6	384	350	Seguro
			376	Seguro
			445	Não-seguro

Para determinar a confiabilidade do alvo foi assumido como seguro apenas o alvo cuja velocidade mínima de perfuração (v_{th}) estimada fosse superior a velocidade máxima de ensaio para os níveis II-A, II e III-A da NIJ Standard 0101.04, ou seja: 350 m/s, 376 m/s e 445 m/s.

O condicionante ante à perfuração para amostras com fabricadas com invólucros de poliuretana foram avaliados por meio d e adaptações à Equação 8. Para um projétil 9 mm como o utilizado neste trabalho, tem-se que o termo $(\bar{X})^3$ na Equação 8 tende a zero, ainda, levando em conta que v_{th} e V_{50} diferem em 10% (JUSSILA, LEPPÄNIEMI, PARONEN, KULOMÄKI, 2005) reorganizam-se os termos acima, ficando a Equação 13, conforme segue.

$$V_{th}(\bar{X}, r) = \sqrt{1 - r} V_{th}(\bar{X}, 0) \quad (13)$$

Para fins de averiguação da segurança relativo ao limite máximo de 44 mm de indentação na plastilina previstos na NIJ 0101.04, resolveu-se a Equação 11 substituindo $m_p = 8,0$ g, $W = 55$ e $T = 2$, menores constantes presentes no trabalho de Prather, Swann e Hawkins (1977), objetivando tratamento matemático mais severo, ou seja, quanto menores as constantes relativas ao corpo impactado junto à blindagem, maiores os diâmetros de cavidade e volumes indentados que podem refletir-se em maiores indentações na plastilina, conforme será visto a seguir.

Na solução aplicou-se $A_d = 0,051 \times n$ (g/cm²), ou seja, a gramatura da lâmina de tecido multiplicado pelo número de camadas. As V_p foram assumidas como as velocidades máximas presentes à NIJ 0101.04 nos níveis II-A, II e III-A, 350 m/s, 376 m/s e 445 m/s, respectivamente.

Ao obter os diâmetros de cavidade estimados, estes foram convertidos para os volumes indentados na plastilina (Vol) em mm³, considerando a massa de trauma na plastilina como uma meia esfera, de acordo com a Equação 14.

$$Vol = \frac{\pi D^3}{12} \quad (14)$$

Do volume indentado determinado com a Equação 14, seguiu-se à solução gráfica das condições apresentadas, utilizando as conversões efetuadas no gráfico de Park *et al* (2012), como pode ser visto na Figura 24. Cabe ressaltar que pela solução gráfica do modelo teórico proposto, amostras com oito e seis

lâminas estarão em situação não segura quanto ao limite de 44 mm de trauma balístico previsto na NIJ caso impactadas no nível III-A. Esta condição de não confiabilidade esteve presente na análise do v_{th} . Ocorreram casos em que as indentações teóricas ficaram entre 18 mm e 20 de mm. Tendo em vista que o gráfico de Park *et al* (2012) não confere exatidão nessa faixa, foi considerado que as indentações estimadas nos dois pontos existentes na faixa ficariam abaixo de 20 mm.

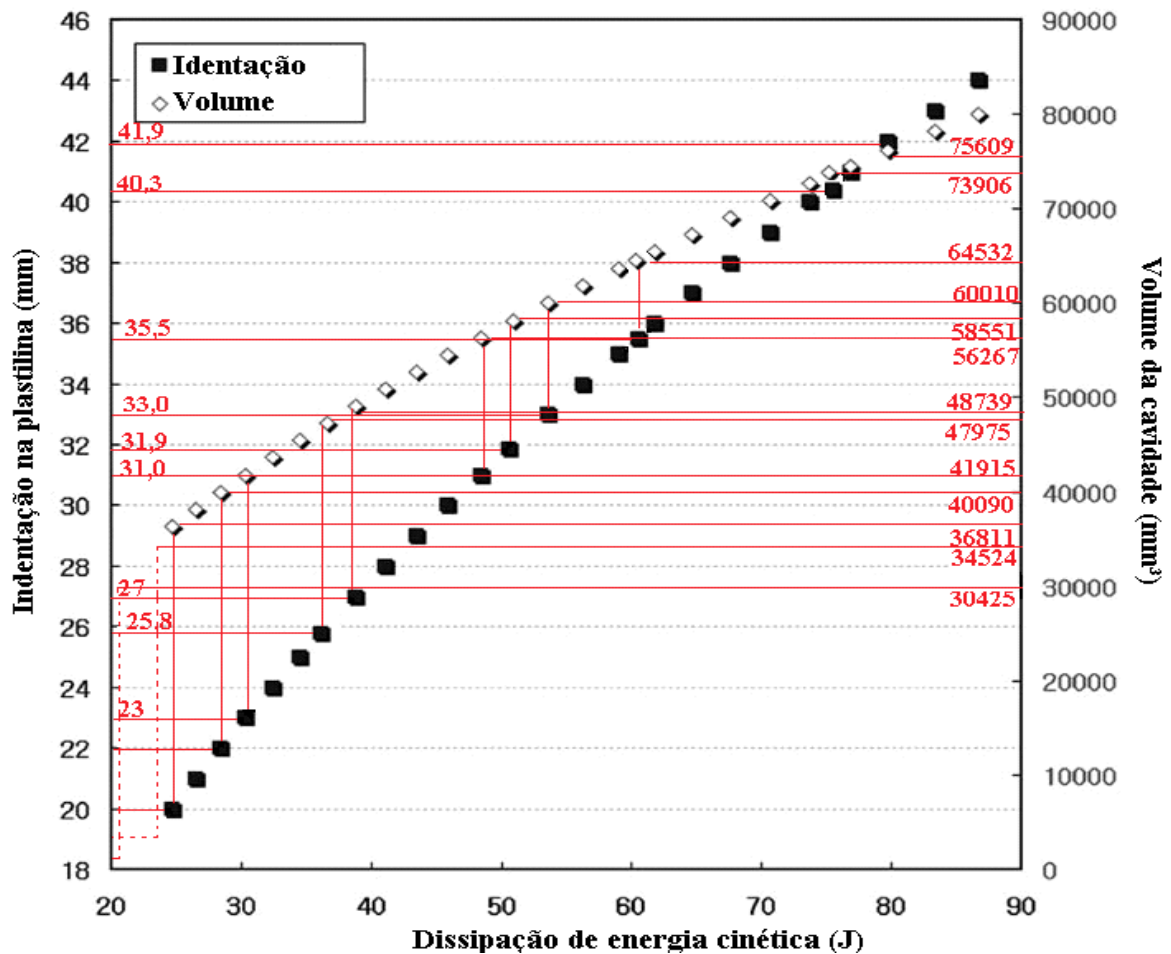


Figura 24 - Solução gráfica para as indentações na plastilina

Fonte: adaptado de PARK *et al* (2012)

Os resultados da solução gráfica estão dispostos na Tabela 8, para variação de número de camadas de tecido de aramida em 6, 8, 10, 12 e 14 lâminas, conforme a necessidade experimental do Grupo 2. As indentações teóricas presentes no gráfico foram obtidas com auxílio da Figura 24.

Tabela 8. Solução das equações 11 e 14 com variação no número de lâminas de Kevlar® para as velocidades máximas dos níveis II-A, II e III-A da NIJ *Standard* 0101.04

Número de lâminas (Gramatura kg/m ²)	Velocidade do projétil (m/s)	Diâmetro de cavidade esperado (mm)	Volume de indentação (mm ³)	Indentação teórica (mm)
14 (7,14)	350	48,8	30425	<20
	376	52	36811	20
	445	59,9	56267	31
12 (6,12)	350	50,9	34524	<20
	376	54,3	41915	23
	445	62,7	64532	35
10 (5,1)	350	53,5	40090	22
	376	57,1	48739	27
	445	66,1	75609	42
8 (4,08)	350	56,8	47975	26
	376	60,7	58551	32
	445	70,4	91346	>46
6 (3,06)	350	61,2	60010	33
	376	65,6	73906	40
	445	76,4	116748	>46

3.3.2. Preparação dos alvos

Serão montados três tipos de alvos quadrados, dimensões 280 x 280 mm, em que o Kevlar® XP S103 será cortado com tesoura industrial de lâmina de 8 polegadas marca KM modelo AX-Q.

O primeiro tipo é utilizado para os ensaios balísticos com a proteção de PU. Nos alvos envoltos por PU, cada alvo utiliza a de 50 g de pré-polímero e 50 g de polioliol, a aplicação será por meio de pincel e a cura será dada por prensagem em prensa modelo Simpelkampf com carga de 20 Kgf/cm², temperatura de 65° C e tempo de 25 minutos. Esses processos foram executados no Laboratório de Painéis de Madeira da UFPR. Não ocorrendo aplicação entre camadas, apenas por suas faces externas, conforme mostra a Figura 25.

O segundo tipo é utilizado para os ensaios sem PU sendo apenas utilizado a adesão por costura quadrada, 260 mm x 260 mm, em máquina de braço curto

com transporte triplo marca Sun Special modelo 3166L18 com a linha de nylon multifilamento.

O terceiro tipo é utilizado para os ensaios sem PU e com proteção por solução termo selada de nylon/PVC em por máquina de costura ultrassônica marca LANMAX modelo LM-100B, este tipo de amostra também será costurado por costura quadrada com fio de nylon multifilamento.



Figura 25 - Preparação dos alvos envoltos por de PU

As amostras de Kevlar puro e de PU, visando a garantia de sua inviolabilidade antes dos ensaios balísticos ou ensaios de degradação, serão ainda envelopadas por plástico de PVC 010, termos selados em suas extremidades por máquina de costura ultrassônica. Os invólucros e plástico cristal apenas serão violados no momento dos ensaios. Todas as operações que não envolvem o emprego da PU serão feitas na Seção de Correaria do Parque Regional de Manutenção/5.

As amostras foram divididas em dois grupos de ensaios: o Grupo 1 de Amostras, foi formado por laminados com 8 camadas de tecido de aramida e o Grupo 2 foi variado o número de camadas de tecido por alvo.

O Grupo 1 possui dois subgrupos: o subgrupo (a) é composto por quatro alvos com oito lâminas de Kevlar®, um alvo de aramida pura e um alvo com PU na condição de alvo seco, e outros dois, um com PU e outro sem proteção, foram antes dos testes imersos em água potável por seis minutos, o subgrupo (b) foi formado por alvos com oito camadas de tecido de aramida sendo um alvo de aramida sem PU, um alvo com proteção de PU e dois de aramida pura protegido pelo invólucro de nylon/PVC, um alvo de cada tipo de invólucro foi irradiados por radiação UVC, na câmara de envelhecimento do Laboratório de Polímeros e

Compósitos da UTFPR, por 1100 horas, sendo 550 horas de exposição para cada face antes dos testes balísticos, as amostras ficaram distantes de 40 cm da lâmpada. Todos os alvos do Grupo 1 foram ensaiados com seis impactos de 9 mm com velocidades de $367 \text{ m/s} \pm 9 \text{ m/s}$ (nível II da NIJ 0101.04). O desempenho dos alvos foi avaliado pela presença ou não de perfuração no alvo e indentação na plastilina, considerando-se alvo reprovado aquele perfurado pela munição ou cuja indentação ficar acima dos 44 mm previstos na norma. Em caso de perfuração total não mediu-se a indentação.

A Tabela 9 descreve a nomenclatura de cada amostra do Grupo 1, seguindo o código: NL: número de lâminas (08); CP: característica de proteção (S: sem proteção, PU: poliuretana, Ny: nylon); AD: agente de degradação (N: nenhum, A: imersão em água potável, UV: irradiação por UVC).

Tabela 9 – Definições do Grupo 1 de amostras, quanto aos alvos e ao procedimento experimental

Sub-grupo	Nome da amostra	Número de lâminas (NL)	Característica da proteção (CP)	Agente de Degradação (AD)
(a)	08-S-N	8	Sem proteção	Nenhum
	08-S-A	8	Sem proteção	Imersão em água potável
	08-PU-N	8	Poliuretana	Nenhum
	08-PU-A	8	Poliuretana	Imersão em água potável
(b)	08-S-UV	8	Sem proteção	Irradiação por UVC
	08-PU-UV	8	Poliuretana	Irradiação por UVC
	08-Ny-N	8	Nylon	Nenhum
	08-Ny-UV	8	Nylon	Irradiação por UVC

O Grupo 2 será processado somente com Kevlar® XP S103. As amostras variaram em 6, 8, 10, 12 e 14 lâminas, e receberam 6 impactos de 9 mm com as velocidades: dois a $341 \text{ m/s} \pm 9 \text{ m/s}$, dois a $367 \text{ m/s} \pm 9 \text{ m/s}$ e dois a $436 \text{ m/s} \pm 9 \text{ m/s}$. Nenhum alvo foi envelhecido ou recebeu invólucro de proteção semelhante aos do Grupo 1.

Os alvos foram mantidos dentro de invólucros de plástico cristal para manutenção de suas propriedades, sendo os invólucros violados por ocasião dos ensaios balísticos. Todas as amostras foram costuradas por fio de nylon. Foi avaliado o desempenho balístico de cada amostra pela não presença de perfuração total nos alvos e mensurando as indentações na plastilina, com limitante de 44 mm. No caso de perfuração total não ocorreu medição também medição na profundidade de deformação. A Tabela 10 resume a condição das amostras para ensaio e nomeia os alvos.

Tabela 10 – Condições das amostras e ensaio para o Grupo 2

Nome da amostra	Número de lâminas	Velocidades referência	Impactos balísticos
A14	14	341 m/s	2
		367 m/s	2
		436 m/s	2
A12	12	341 m/s	2
		367 m/s	2
		436 m/s	2
A10	10	341 m/s	2
		367 m/s	2
		436 m/s	2
A08	08	341 m/s	2
		367 m/s	2
		436 m/s	2
A06	06	341 m/s	2
		367 m/s	2
		436 m/s	2

3.3.3. Ensaio Balísticos

As Amostras do Grupo 1 (a) foram testadas no Laboratório Balístico da BCA Têxtil Ltda. em São José dos Campos-SP, As amostras 08-S-UV, 08-PU-UV, 08-Ny-N e 08-Ny-UV, foram ensaiadas no Balístico do Centro de Inovação e Tecnologia da empresa Du Pont do Brasil S.A, em Paulínia-SP, bem como todas as amostras do Grupo 2. Os disparos efetuados nos dois grupos seguiram a configuração disposta na Figura 26.

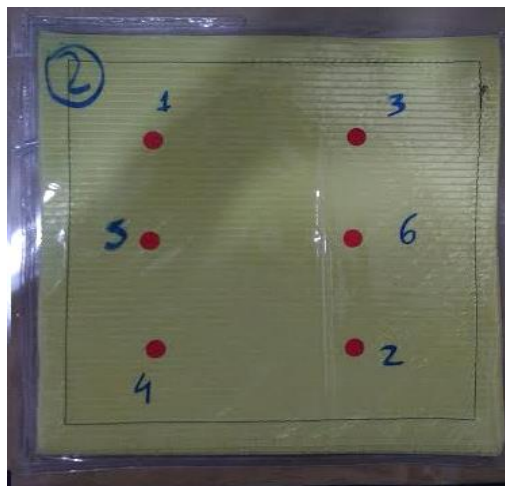


Figura 26 - Configuração da série de disparos em alvo balístico

As colunas de disparos, isto é os disparos verticais 1,5,4 e 3,6,2, ficaram distantes das bordas 70 mm verticalmente e horizontalmente, e 140 mm entre si, com tolerância de 10 mm. Os ensaios balísticos foram realizados nos laboratórios balísticos das empresas BCA Têxtil e Du Pont do Brasil S.A. A montagem experimental seguiu em conformidade com a *NIJ Standard 0101.04*, sendo que a face do colete a ser impactada foi fixada com auxílio de elásticos a um recipiente de metal com face posterior de madeira (cuja abertura volta-se à face do alvo) de seção reta quadrada de 610 mm x 610 e profundidade de 140 mm, preenchido completamente por plastilina.

As medições na plastilina foram mensuradas utilizando paquímetro digital, após a superfície da massa sofrer um aplainamento por uma régua de metal, com finalidade da retirada de mossas indesejáveis. Os diâmetros de cavidade foram considerados as maiores distâncias entre dois pontos, passando pelo ponto em que ocorreu o impacto balístico. Os diâmetros de cavidades bem como as endentações na plastilina foram tomados conforme indica a Figura 27.



Figura 27 – Esquema da aferição de diâmetros de cavidade e indentação na plastilina após o aplainamento

Fonte: Adaptado de ALANKAYA, SENYILMAZ, TURKER, 2013

A utilização do projétil de 9mm deu-se por motivos de padronização dos ensaios e por ser um projétil de fácil aquisição pelos laboratórios balísticos. As munições foram disparadas com auxílio de uma estativa associada a um provete calibre 9 mm com mira a laser. A distância da boca do cano da arma ao alvo foi fixada em 5 metros. A velocidade a ser considerada no impacto do projétil será mensurada a 2m de distância do alvo por meio de sensores óticos e cronógrafos. A montagem experimental está representada na Figura 28.

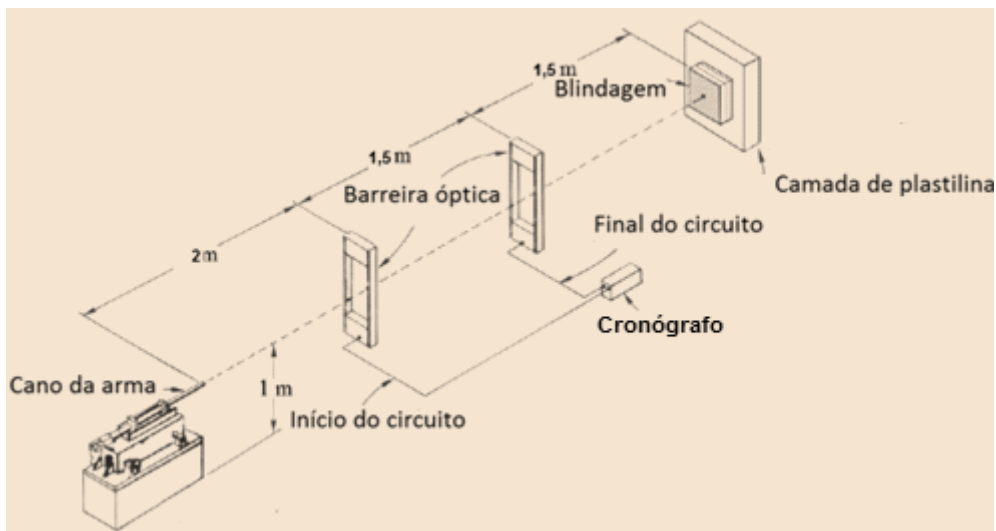


Figura 28 - Representação da montagem experimental do ensaio balístico

Fonte: adaptado de DA SILVA, 2014

Para variar a velocidade desses impactos balísticos nos níveis II-A, II e III-A da NIJ *Standard* 0101.04 foi empregada a pólvora de base dupla, de modo que o ajuste das velocidades nominais deu-se com a variação de massa de pólvora. O projétil é desgastado de seu cartucho para que seja introduzida determinada quantidade de propelente, sendo engastado novamente antes do disparo.

A cada munição preparada fora executado um tiro sem alvo com aferição da velocidade. Conforme a medição estivesse abaixo ou acima da velocidade de referência, colocava-se mais ou menos pólvora no cartucho do projétil, respectivamente. O processo de tentativa e erro encerrou-se nas ocasiões em que ocorressem três disparos sem alvo com velocidades aferidas na faixa permitida pelos níveis da NIJ. Assim sendo, iniciava-se o ensaio com o nível desejado.

3.3.4. MEV

A análise de fraturas nos alvos ocasionadas pelos impactos dos projetis nas fibras do tecido balístico e na PU foram estudadas por meio de micrografias por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR, Zeiss EVO MA15, e do Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR, TESCAN VEGA3 LMU.

As micrografias foram feitas a partir de amostras colhidas próximas de regiões contíguas à perfuração, de regiões deformadas tão e somente pelas frentes de ondas transmitidas e compressão do penetrador (imediatamente após a última lâmina perfurada) e as últimas camadas. No último caso, mais precisamente na região de cone de deformação, região em contato direto com a massa e formadas devido aos efeitos da propagação das frentes de onda oriundas do impacto balístico (BHATNAGAR, 2006). A camada de parada do projétil foi determinada por inspeção visual, ou seja, abriu-se os alvos para verificação em que camada ficou retido.

Por questões de padronização foram retiradas amostras dos disparos de número 4 das amostras do Grupo 1. No grupo 2 foram avaliados os tiros com maior velocidade de impacto por motivos diversos, conforme o objetivo da análise, com as devidas justificativas explicitadas no próximo capítulo.

As amostras do Grupo 1, foram analisadas no tocante a alterações de estrutura química da aramida e proteções pelos agentes de envelhecimento por meio de espectroscopia de infravermelho.

3.3.5. FTIR

As amostras do Grupo 1, foram analisadas no tocante a alterações de estrutura química da aramida e proteções pelos agentes de envelhecimento por meio de espectroscopia de infravermelho.

Foi utilizado o Espectrofotômetro de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) da UTFPR, Varian, modelo 640-IR, medidas no ATR (Attenuated Total Reflection - reflectância total atenuada) Pike; modelo Miracle, com cristal de seleneto de zinco (ZnSe). Resolução de 4 cm^{-1} e faixa de leitura de 4000 a 650 cm^{-1} .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, associados aos Grupos 1 e 2 de amostras, nos ensaios balísticos, nas análises de fratura por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e mudanças químicas advindas do envelhecimento verificadas por meio de espectroscopia de infravermelho (FTIR).

4.1. Grupo 1 (a)

As amostras do grupo 1, subgrupo a, foram submetidas a ensaios relativos à degradação da aramida por contato com a água, bem como seu desempenho balístico. Neste caso verificou-se o grau de proteção conferido pela poliuretana à amostra ante ao agente de envelhecimento. Foram conduzidas 03 (três) categorias de testes: desempenho balístico, análise do modo de falha das fibras por meio de MEV análise da degradação da fibra por meio de espectroscopia de infravermelho.

4.1.1. Desempenho balístico

Os resultados do ensaio balístico de indentação na plastilina em função da velocidade do projétil, para cada impacto nas amostras 08-S-N, 08-PU-N e 08-PU-A, estão dispostos na Figura 29. A amostra 08-S-A, alvo formado somente por Kevlar® costurado por fio de nylon imerso em água antes do ensaio, foi perfurada por todos os impactos executados nas velocidades de: 381 m/s, 354 m/s, 370 m/s, 376 m/s, 357 m/s e 366 m/s (ordem de aferição das velocidades dos disparos de 1 a 6).

A velocidade de 381 m/s ficou acima limites normalizados em 1,3%, e também ocorreram duas velocidade abaixo da desejável, 357 m/s e 354 m/s, 0,3% e 1,1 % de diminuição, respectivamente. Tal fato deu-se por dificuldades de calibração da quantidade de pólvora necessária para que o projétil alcançasse a faixa de velocidades desejável. Mesmo nessas condições de impactos abaixo da faixa da NIJ 0101.04, as perfurações ocorreram.

A condição de perfuração completa leva à reprovação do alvo, conforme a NIJ 0101.04, item 2.4, não sendo medida a indentação na plastilina.

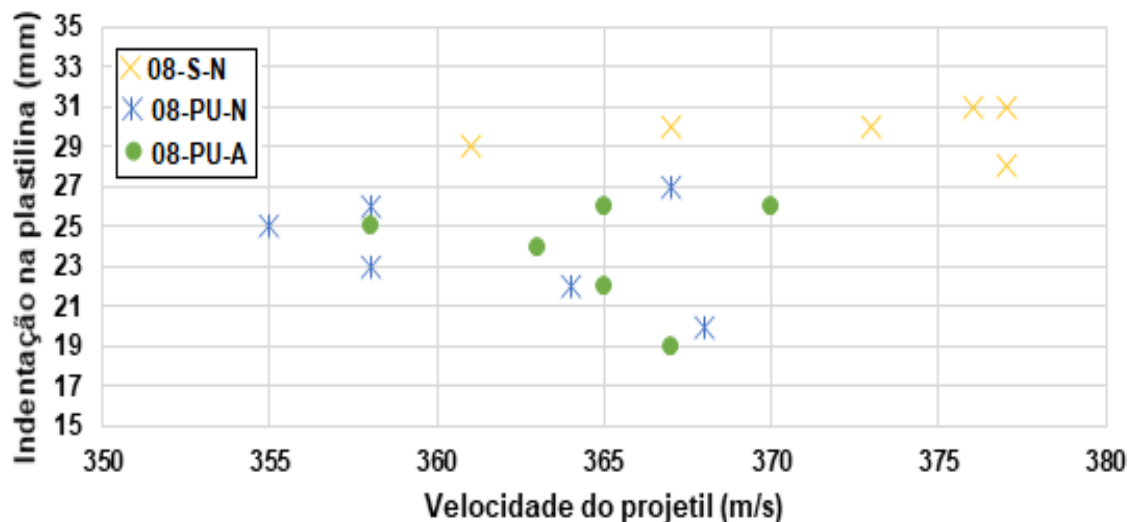


Figura 29 - Indentação na plastilina em função da velocidade do projétil para os seis impactos balísticos nas amostras 08-S-N, 08-PU-N e 08-PU-A

A análise da Figura 28 permite concluir que amostras 08-S-N, 08-PU-N e 08-PU-A, atendem ao critério da NIJ *Standard* 0101.04 quanto à profundidade de deformação na plastilina. Observa-se que as amostras recobertas por PU apresentam indentações na plastilina menores em relação à amostra costurada com fio de poliamida e não imersa em água, sendo as médias de $23,8 \text{ mm} \pm 2,4$ para a amostra 08-PU-N, $23,7 \text{ mm} \pm 2,5$ para a amostra 08-PU-A e $29,8 \text{ mm} \pm 1,0$ para a amostra 08-S-N. Por meio de teste t de student pode-se afirmar que as duas médias são iguais com confiabilidade de 95%.

Um dos efeitos a serem considerados no tocante ao ganho de desempenho balístico pela aplicação de PU é que esta configura-se como um meio de menor impedância em relação ao tecido e aramida. A PU possui densidade de $1,09 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a aramida possui $1,44 \text{ g/cm}^3$, dessa forma, a onda compressiva resultante da mudança de meios atenuaria o efeito de propagação da onda de choque.

A amostra 08-S-N com gramatura de $4,08 \text{ Kg/m}^2$, ensaiada a velocidade de referência de 367 m/s , apresentou desempenho balístico superior se comparada com o experimento de Bilisik e Turhan (2009). A amostra dos pesquisadores sofreu 31 mm de trauma ante ao impacto de 9 mm , possuindo

maior gramatura ($4,27 \text{ kg/m}^2$), costura mais complexa, fora ensaiada com velocidades menores e distâncias maior.

A amostra 08-S-A foi rejeitada pelo critério de não perfuração. É possível atribuir a perda de desempenho balístico à imersão em água, ou seja, muito provavelmente seu v_{th} diminuiu para um valor menor ou igual a 354 m/s , abaixo da menor velocidade referente ao nível II-A da NIJ 0101.04. Tal fenômeno não foi observado na amostra com a camada protetora de PU a qual fora imersa em água.

É importante verificar que não necessariamente as maiores velocidades representam as maiores deformações. No caso da amostra 08-PU-N desse Grupo, o menor trauma (20 mm) esteve associado à maior velocidade, reforçando o caráter estatístico no tratamento dos dados e necessidade de estabelecer margens de erros.

Outro enfoque que é necessário ser avaliado é que a adição da PU faz com que ocorra um acréscimo na gramatura da solução final. Uma aproximação pode ser feita somando a gramatura do alvo com 8 camadas ($4,08 \text{ kg/m}^2$) somando aos 100 g utilizados na fabricação pela área do alvo $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$. A gramatura desse sistema balístico ficaria em torno de $5,35 \text{ kg/m}^2$, pela Equação 6, calcula-se um v_{th} de aproximadamente 455 m/s , e assim, resolvendo a Equação 9 para um $r=23,5 \%$, chega-se a uma velocidade mínima de perfuração de 398 m/s para o alvo em questão, ou seja, um alvo seguro contra um impacto a uma velocidade máxima de 376 m/s .

Resolvendo então a Equação 12, utilizando os mesmos dados já descritos no item 2.4 do capítulo 2, constantes presentes no trabalho de Prather; Swann e Hawkins: $W=55$ e $T=2$, dado da munição: $m_p= 8,0 \text{ g}$, para as velocidades de referência (367 m/s) e máxima (376 m/s), são obtidos diâmetros de cavidade teóricos de $55,1 \text{ mm}$ e $56,3 \text{ mm}$.

Dos resultados extraídos da Equação 12, aplica-se na Equação 13, remetendo à volumes de cavidade de 43.795 mm^3 e 46.719 mm^3 , respectivamente. As soluções gráficas para as indentações teóricas na plastilina referentes aos volumes assim obtidos estão presentes à Figura 30.

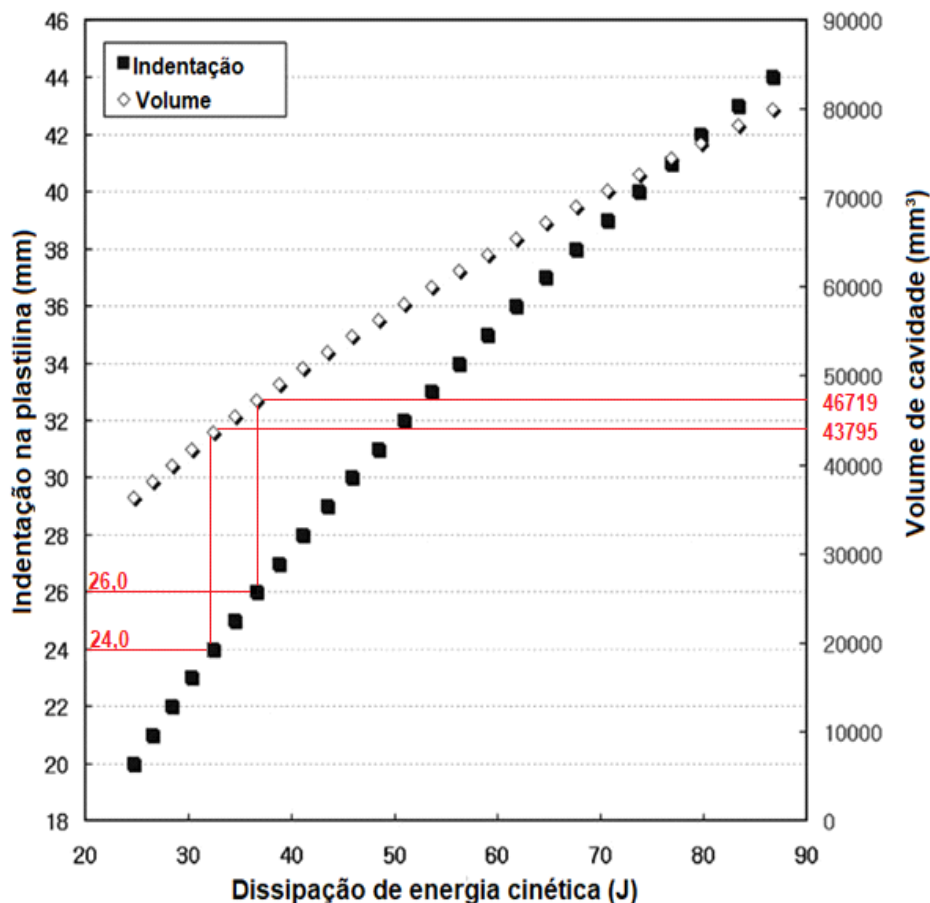


Figura 30 - Solução gráfica para as indentações teóricas para a solução de Kevlar®/PU

Obteve-se assim 24 mm como a média de indentação para o nível, ou seja, velocidade de 367 m/s, e um máximo de 26 mm para um projétil a 376 m/s. O valor médio dos traumas para a amostra com PU seca de 23,8 mm e 23,7 mm para a molhada diferem do calculado em menos de 1%, já o valor máximo do ensaio da amostra seca diferiu em 1 mm do teórico, mas o máximo para o alvo imerso em água igualou-se ao previsto teoricamente. Tem-se que a adição da PU, ao elevar sua gramatura do alvo balístico o aproximaria do resultado obtido para um alvo fabricado apenas por Kevlar®.

Cabe destacar que esse tipo de abordagem não foi verificado na literatura e que a predição dos resultados com baixa taxa de erro em relação aos resultados experimentais aumentam a confiabilidade da previsão descrita no capítulo 3.

4.1.2 Análise de fraturas

Na Figura 31 (a) é apresentada análise de fratura por MEV da amostra 08-S-N, na qual ocorreu apenas perfuração parcial, sendo observadas três regiões distintas: a região 1, em que existem fibras ainda orientadas, a região 3 onde é possível visualizar rasgamento com arrancada de material (*shear plugging*) e a região 2 em que ocorre desorientação da aramida. Os danos das duas últimas regiões foram causados provavelmente pela onda de choque e por esforço de compressão da munição a qual foi parada na camada anterior. Na Figura 31 (b) é apresentada região de fratura da amostra 08-S-N sendo possível visualizar a presença da aramida orientada na região 1, um feixe de fibras transverso na região 2 pouco deformado em relação ao que observou-se na Figura 31 (a), exceto pelas quebras presentes em 3, e 4, podendo ser por estiramento e compressão transversal irregular.

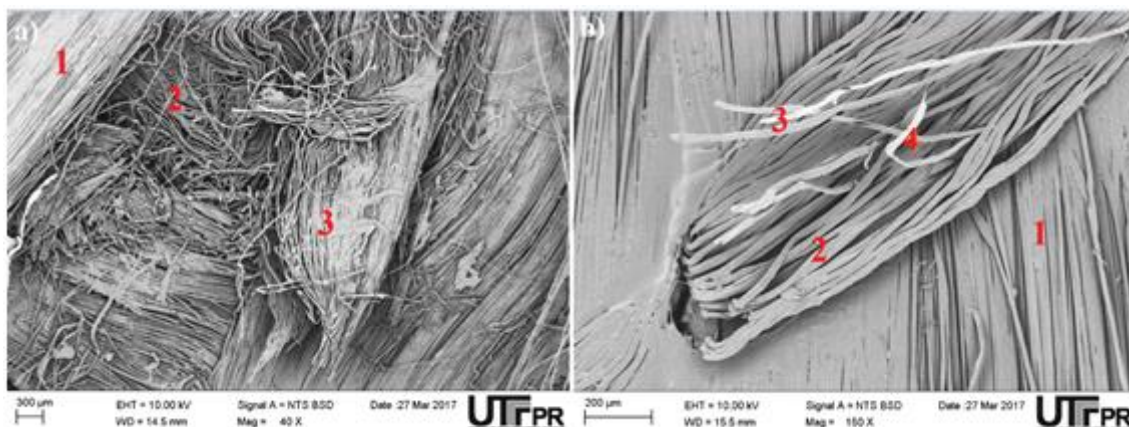


Figura 31 - (a). Análise de fratura por MEV da terceira camada da amostra 08-S-N em região deformada pela onda de choque e (b) análise de fratura por MEV da última camada da amostra 08-S-N em região de cone de deformação

Na Figura 32 (a) é apresentada análise de fratura por MEV da amostra 08-S-A. É possível visualizar a presença da orientação dos feixes de aramida na região 1, já na região 2 é visível a desorientação e falhas por estiramento das fibras causada pela deformação causada pela passagem do projétil. Na Figura 32 (b) é apresentada região de falha por MEV da amostra 08-S-A sendo possível visualizar falha por dois modos principais: (1) fratura por compressão transversal irregular e (2) falha das fibras por região com defeito. Excetuando os dois modos principais, é possível verificar outros tipos de falha em menor número como

estiramentos e defeitos por compressão à altas taxas de deformação e ainda outros estados não identificáveis diretamente, os quais podem ter sido gerados por sinergia entre os mecanismos presentes. Estas condições estão atreladas à ação de perfuração do projétil, que por não ter sido parado não pôde findar seu processo de deformação e fragmentação da camisa de cobre e pela frente de onda transmitida às fibras por todas as camadas do alvo. Cabe lembrar que esses diferentes fenômenos causam diferentes naturezas de carregamento e esforços mecânicos.

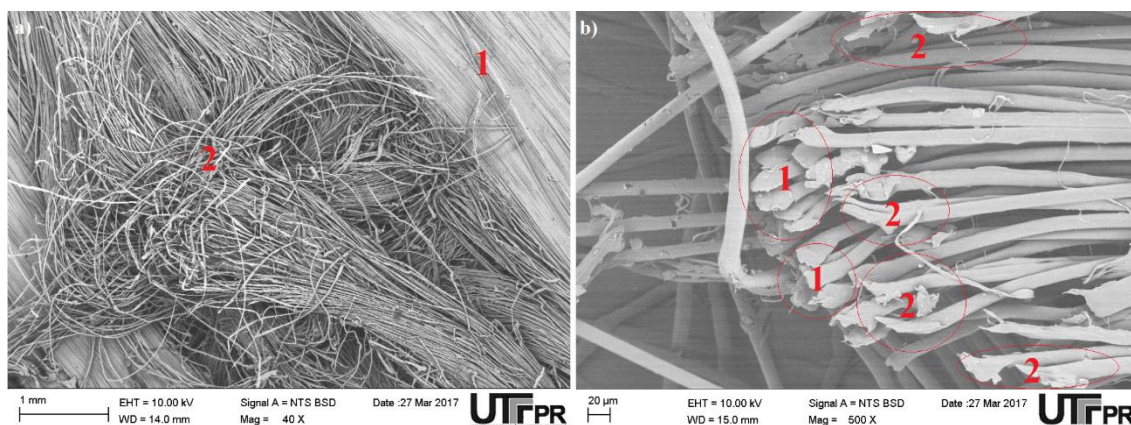


Figura 32 - (a). Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-S-A em região de perfuração do projétil e (b) análise de fratura por MEV da última camada da 08-S-A em região de perfuração do projétil

Na Figura 33 são apresentadas análises de fratura da primeira camada por MEV das amostras que foram recobertas com PU: (a) amostra 08-PU-N e (b) amostra 08-PU-A.

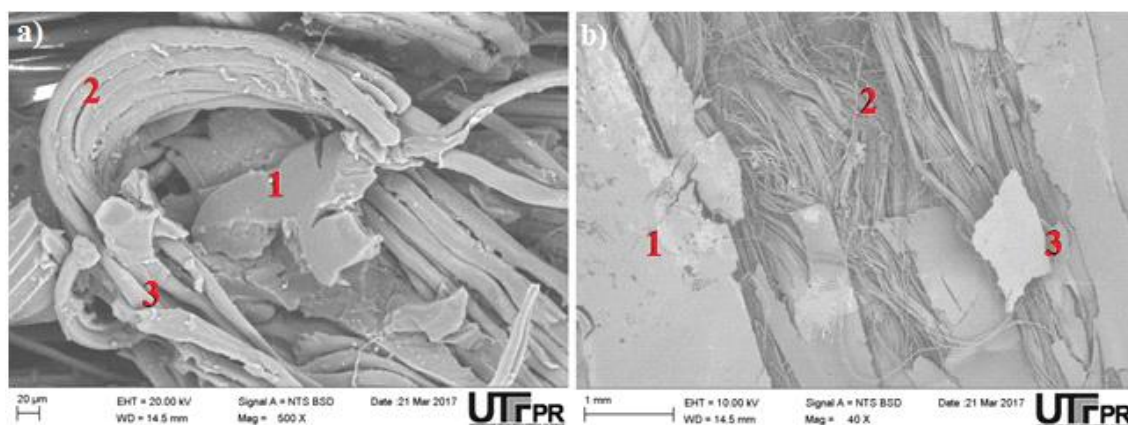


Figura 33 - (a). Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-PU-N em região de perfuração do projétil e (b) análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-PU-A em região de perfuração do projétil

Na Figura 33 (a) observa-se a PU presente na região 1; na região 2 as fibras de aramida apresentam falha em região com defeito na extremidade do feixe, uma vez que não se visualiza mudanças de diâmetro. A região 3 apresenta fibras deformada por compressão irregular. Na Figura 33 (b) notam-se três regiões: a região 1 mostra o relevo da PU; na região 2 tem-se desorientação por toda a extensão da área ocupada pela aramida, diferente do que foi observado anteriormente, provocada esforços provenientes da perfuração do projétil e na região 3 ocorreram trincas e falhas na PU. Na região 1 da Figura 33 (a), foi possível observar a região de espelho por fratura frágil na poliuretana, conforme descrito por Azevedo (2009).

Cabe destacar a forma generalizada com que ocorre as fraturas nas fibras na região 2, levando a considerar que em um tecido multiaxial a teoria de solitação de fibras primárias e secundárias (NAIKI, 2013) pelo projétil deixa de ter aplicabilidade. Ou seja, o previsto em modelos como o de Naiki (2013) é que somente as fibras primárias sofreram deformação por natureza do contato com o projétil, sendo as fibras secundárias (ou circunvizinhas à área de ação da bala) acabam por receber solitações por transmissão de energia. Enquanto nos tecidos multiaxiais como pode ser visto nas Figuras 31, 32 e 33, uma extensa área de contendo feixes sofrem ação direta do projétil, sequer sendo possível distinguir fibras primárias e secundárias.

4.1.3 FTIR

Na Figura 34 são apresentados os espectrogramas das amostras 08-S-N e amostra 08-S-A. É possível verificar que as mudanças ocorreram na transmitância na banda característica próxima 3312 cm^{-1} (estiramento N-H referente a um grupo amida) (KIM, HSU, ISHIDA, 1985). Anomalias também podem ser observadas nos picos de banda de 2983 cm^{-1} e 2915 cm^{-1} da amostra 08-S-N, hidrogênio alifático, quando comparados com o único pico presente na faixa de 2950 cm^{-1} , uma banda característica de estrutura ácido-base OH-N (ANCHEYTA, TREJO, RANA, 2010). Este tipo de ocorrência pode indicar oxidação de um hidrogênio ligados ao nitrogênio da cadeia principal.

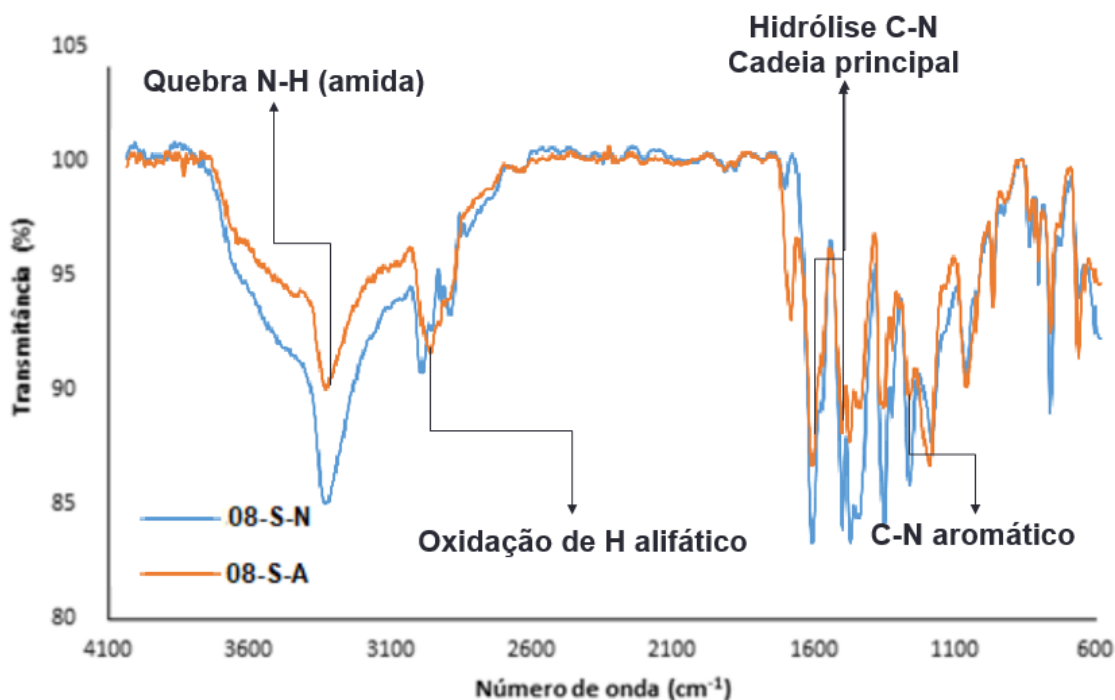


Figura 34 - Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®, uma seca e outra imersa em água por seis minutos

A intensidade da banda de pico a 1639 cm^{-1} e 1537 cm^{-1} , características da aramida para as Amida I e Amida II, respectivamente (KIM, HSU, ISHIDA, 1985), podem indicar ocorrência de hidrólise em ligações poliméricas do grupo C-N pertencente à cadeia principal, formando ácido carboxílico e amida, também esta redução ocorreu no pico característico referente à Amida III, estiramento do C-N aromático, em 1303 cm^{-1} (DAVIS, CHIN, LIN, PETIT, 2010).

Uma banda atípica ocorreu em 1710 cm^{-1} para a 08-S-A com muito maior intensidade em relação ao que ocorreu na amostra 08-S-N. Ainda, ocorreu atenuação no pico de 821 cm^{-1} na amostra 08-S-A, este número de onda marca uma flexão C-H fora do plano (FORSTER, PINTUSX, MESSIN, RILEY, PETIT, ROSSITER, CHIN, RICE, FORSTER, 2011). A ocorrência de todas essas alterações de banda levam a considerar a degradação do polímero por hidrólise, a consequente perda de desempenho balístico observado nos ensaios e o aparecimento de fraturas por fragilização pré-existente.

A Figura 35 apresenta a sobreposição de espectroscopia de infravermelho de duas amostras de Kevlar®/PU, uma seca e outra imersa em água potável por seis minutos.

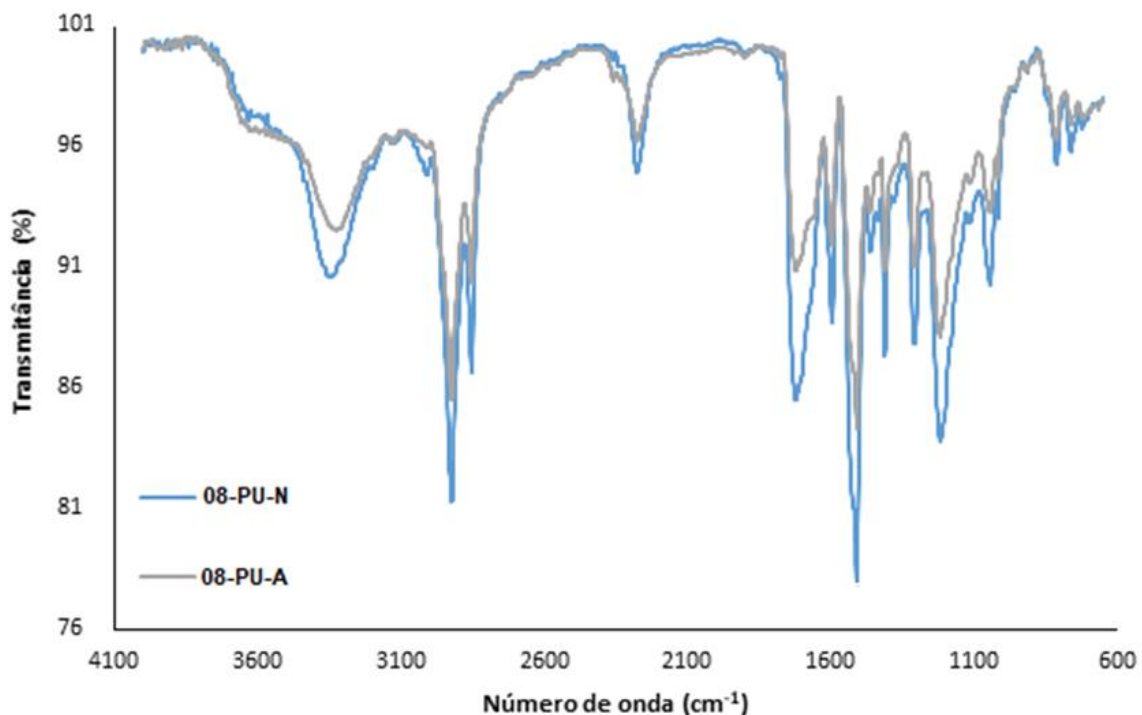


Figura 35 - Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®/PU, uma seca e outra imersa em água por seis minutos

De fato, mutações de transmitância entre amostras secas e úmidas com PU foram menores que na análise do alvo de Kevlar® sem proteção, sendo ainda notável a diferença entre picos característicos, provavelmente devido à cobertura imperfeita, indicando também que a água poderia infiltrar entre as camadas do laminado, muito embora as propriedades mecânicas tenham sofridos efeitos mínimos. Tem-se alterações nos picos característicos na formação Kevlar®/PU em 3330 cm^{-1} , 2275 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} e 1216 cm^{-1} . Cabe salientar que nenhum desses picos possuem formatos diferentes se comparados à aramida pura, sendo então modificados pela adição dos grupos característicos da poliuretana.

4.2. Grupo 1 (b)

As amostras do grupo 1, subgrupo b, foram submetidas e ensaios relativos à degradação da aramida por contato com a água, bem como ao seu desempenho balístico. Tem-se o conjunto de ensaios relativos à degradação das fibras por irradiação ultravioleta e mudanças no desempenho balístico. Procedeu-se três categorias de análises: desempenho balístico, análise de fratura das fibra com imagem de MEV e espectroscopia de infravermelho.

4.2.1 Desempenho balístico

A Figura 36, apresenta os valores de indentação na plastilina relacionados às velocidades do projétil para cada disparo, afim de proceder análise comparativa, estão presentes ainda, os resultados obtidos para as amostras 08-S-N e 08-PU-N, alvos não irradiados por UVC e respectivamente, sem proteção e com proteção de poliuretano. Da análise do gráfico em pauta pode-se inferir que todos as amostras irradiadas perderam desempenho balístico em comparação aos alvos não envelhecidos. A amostra 08-S-UV apresentou os maiores valores de indentação na plastilina e também o maior valor médio, 37 mm, devido ao fato de tecido balístico não apresentar qualquer proteção contra a irradiação por UVC. No alvo protegido pela solução nylon/PVC ocorreram maiores profundidades de indentação e pior desempenho balístico, com média de 34,8 mm em relação às outras amostra com PU. As amostras protegidas com camada de PU apresentaram o melhor desempenho balístico absoluto e a irradiação no alvo de Kevlar®/PU provocou um acréscimo de valor médio na deformação na plastilina de 23,8 mm para 26,3 mm

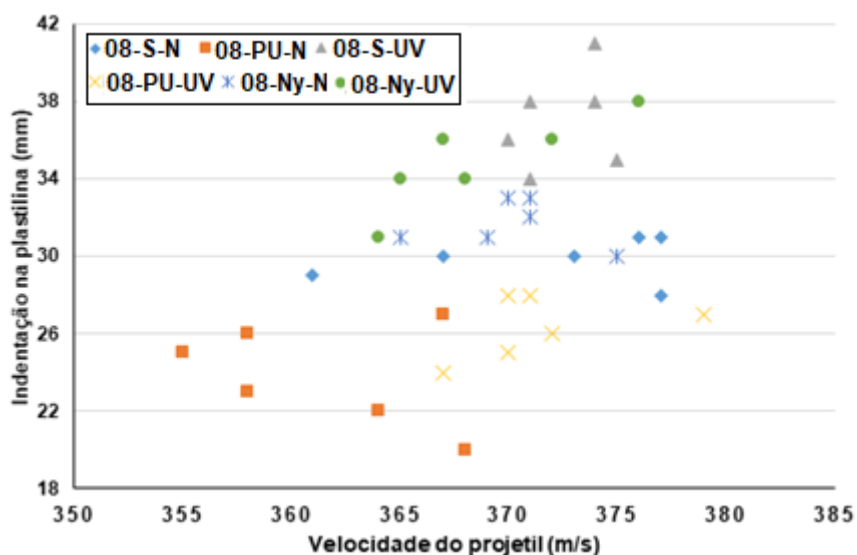


Figura 36 - Indentação na plastilina em função da velocidade do projétil para os seis impactos balísticos nas amostras 08-S-N 08-PU-N, 08-S-UV, 08-PU-UV, 08-Ny-N e 08-Ny-UV

Com auxílio da Figura 37, verifica-se que a energia dissipada na plastilina aumenta em aproximadamente 7,1 J para a proteção de nylon e aproximadamente 4,8 J no caso da proteção de PU, considerando o gráfico de

PARK *et al* (2012). Ou seja, a amostra com proteção de nylon/PVC absorveu menos energia, sobrando maior energia para deformação na plastilina.

Ocorreu variação de desempenho balístico das amostras somente de Kevlar® não irradiadas, uma recoberta por nylon e a outra não. A média das indentações da amostra 08-S-N foi mensurada em 29,8 mm enquanto a amostra 08-Ny-N ficou em 31,7 mm, por teste t de Student, verifica-se que as médias são de fato diferentes com confiabilidade de 95%.

Tem-se que o invólucro de nylon emborrachado não aumenta o desempenho balístico, mesmo tendo acrescido espessura e possuir massa específica menor que a aramida, fato que poderia gerar compressão na onda de choque pós mudança de meio, semelhante ao fenômeno descrito para o caso do a acréscimo da PU. Mesmo o aumento de gramatura de 0,14 kg/m² na solução não produziu qualquer aumento de performance, com os valores de indentação na plastilina maiores que da amostra de Kevlar® sem qualquer proteção.

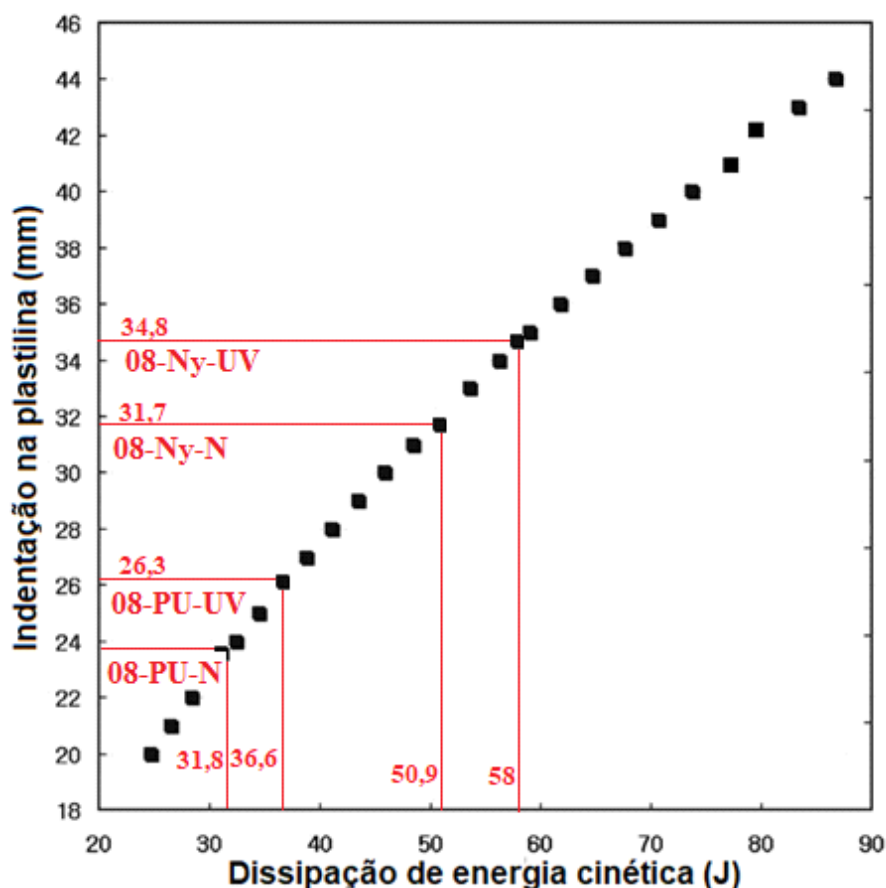


Figura 37 - Energia cinética absorvida pela plastilina para as amostras 08-PU-N, 08-PU-UV, 08-Ny-N e 08-Ny-UV

4.2.2 Análise de fraturas

A Figura 38 apresenta comparativo entre duas amostras de Kevlar®, uma sem e outra com irradiação por UVC.

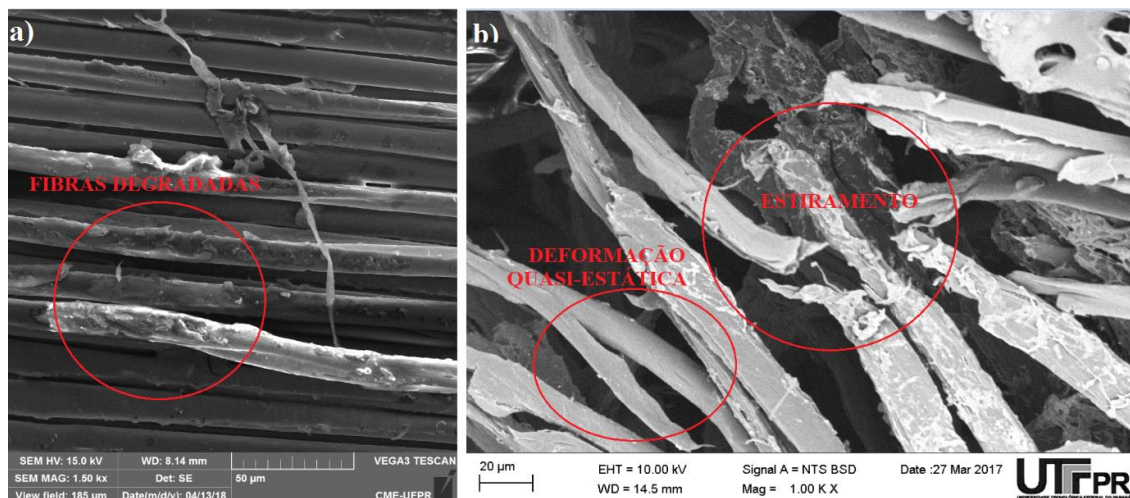


Figura 38 - (a) Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-S-UV em região adjunta à perfuração e (b) análise de fratura por MEV no cone de deformação, oitava camada, da amostra 08-S-N

A Figura 38 (a) tem por finalidade visualizar o aspecto degradado da fibra, um aparente descamar muito diferente do relevo de uma fratura ou fibrilamento, ainda que a imagem apresente algum desfibrilamento. A imagem representa a primeira camada do alvo irradiado, para o tiro de número 4. A imagem do tecido não irradiado, Figura 38 (b), representa a última camada do alvo, numa região de cone de deformação. Nessa região há maior incidência de fraturas por estiramento e deformações quasi-estática, esta última por influência da atenuação significativa da onda transmitida, cuja energia transmitida à plastilina fica em torno de 10 % da energia inicial do projétil.

Cabe ressaltar, que a imagem da Figura 38 (a) apresenta pouca deformação na fibra pois a perfuração na primeira camada costuma dar-se em área reduzida, sendo possível verificar fenômenos de fratura mais apreciáveis em áreas muito próximas à perfuração do projétil.

A Figura 39 compara os relevos de duas amostras de Kevlar®/PU, sendo a Figura 39 (a) uma amostra não irradiada, Figura 39 (b) foi envelhecida por UVC.

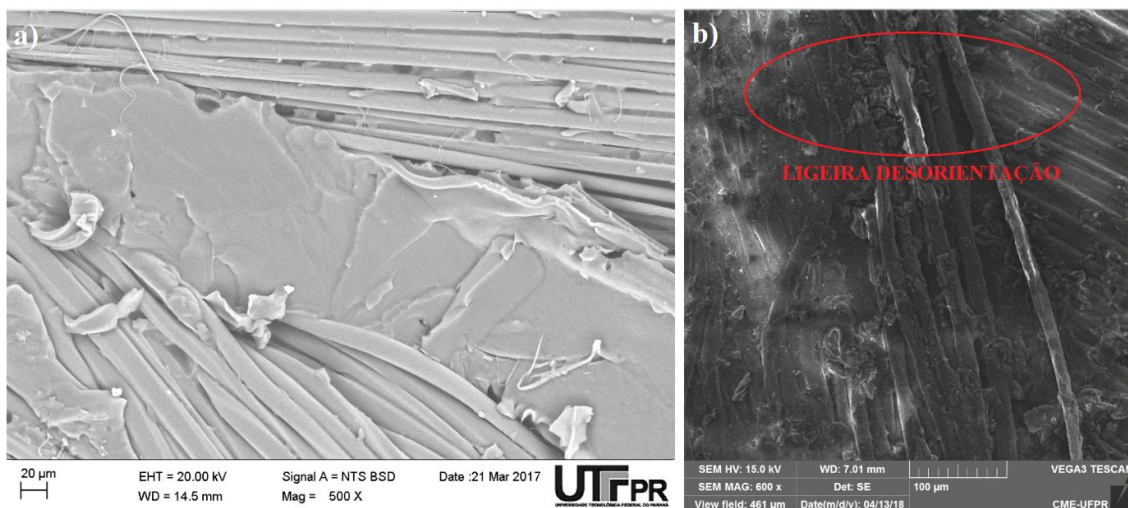


Figura 39 - (a) Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-PU-N em região vizinha à perfuração e (b) análise de fratura por MEV da amostra 08-PU-UV, face frontal, próxima à perfuração

Nas Figuras 39 (a) e 39 (b), ambas retiradas de regiões de perfuração do projétil na primeira camada permitem traçar um comparativo acerca do relevo da PU na Figura 38 (a) a cobertura é mais uniforme, sem a presença perceptível de fraturas ou propagação de trincas catastróficas, envolve por completo as fibras as quais apresentam aspecto pouco deformado e com visível orientação. Em comparação, os feixes de fibra da Figura 39 (b), estão com aspecto menos protegido, a PU apresenta relevo mais poroso e a desorientação, ainda que ligeira existe em algumas regiões.

A Figura 40 explicita os casos em que o alvo ficou envolto pela solução nylon/PVC termoselada.

A imagem mostra feixes de fibra, um deles ainda com aspecto uniforme (a), ainda que envolto por resíduos de naturezas diversas, já que a noção de profundidade aponta para um aumento de espessura e não uma depressão localizada, não ocorrendo ainda descamação longitudinal aparente, neste caso, a amostra não foi envelhecida, na (b) ocorrem áreas de nucleação de pontos de fragilidade, podendo ocasionar rupturas em região com defeito, ainda que visualmente menos aparente que a amostra diretamente irradiada.

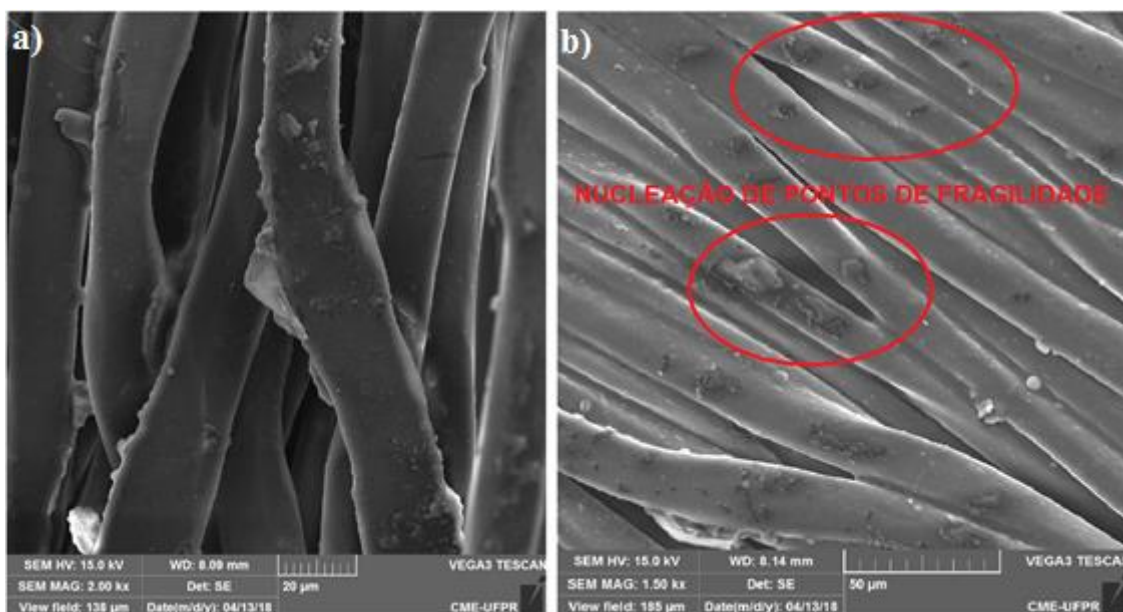


Figura 40 - (a) Análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-Ny-N em região vizinha à perfuração e (b) análise de fratura por MEV da primeira camada da amostra 08-Ny-UV também em região próxima à perfuração do projétil

4.2.3 FTIR

Na Figura 41 visualiza-se a sobreposição dos resultados de espectroscopia de infravermelho (FTIR) por transmitância de uma amostra de Kevlar®. Verifica-se que a irradiação produziu alterações significativas na estrutura do polímero. Estas alterações são identificadas pela mudança do pico característico próximo a 3313 cm^{-1} com diminuição de intensidade, sugerindo oxidação fotolítica iniciada por formação de grupos hidroxila na cadeia principal (NAZARÉ, DAVIS, PENG, CHIN, 2012) já a aparente sobreposição de novos picos pode-se explicar pela formação de álcoois, ácidos e outras aminas, de forma semelhante, a banda relativa ao número de onda 1634 cm^{-1} também sofreu queda de intensidade por oxidação fotolítica (DAVIS, CHIN, LIN, PETIT, 2010).

Podem ser observados ainda picos, anômalos como o presente em 2952 cm^{-1} , mais uma vez, uma possível oxidação em hidrogênio alifático com o aparecimento de uma estrutura ácido-base (ANCHEYTA, TREJO, RANA, 2010). Em 1714 cm^{-1} , o pico pode configurar-se como uma formação C=O por oxidação (DAVIS, CHIN, LIN, PETIT, 2010; ZHANG, ZHANG; CHEN, HAO, WANG, FENG, GUO, 2006). Já mudança no pico próximo a 1301 cm^{-1} pôde ser gerada por cisão

parcial da cadeia principal e produção de amida e conseguinte acréscimo de grupos N-H (LI; GU, XUE, LIANG; YUAN, 2013).

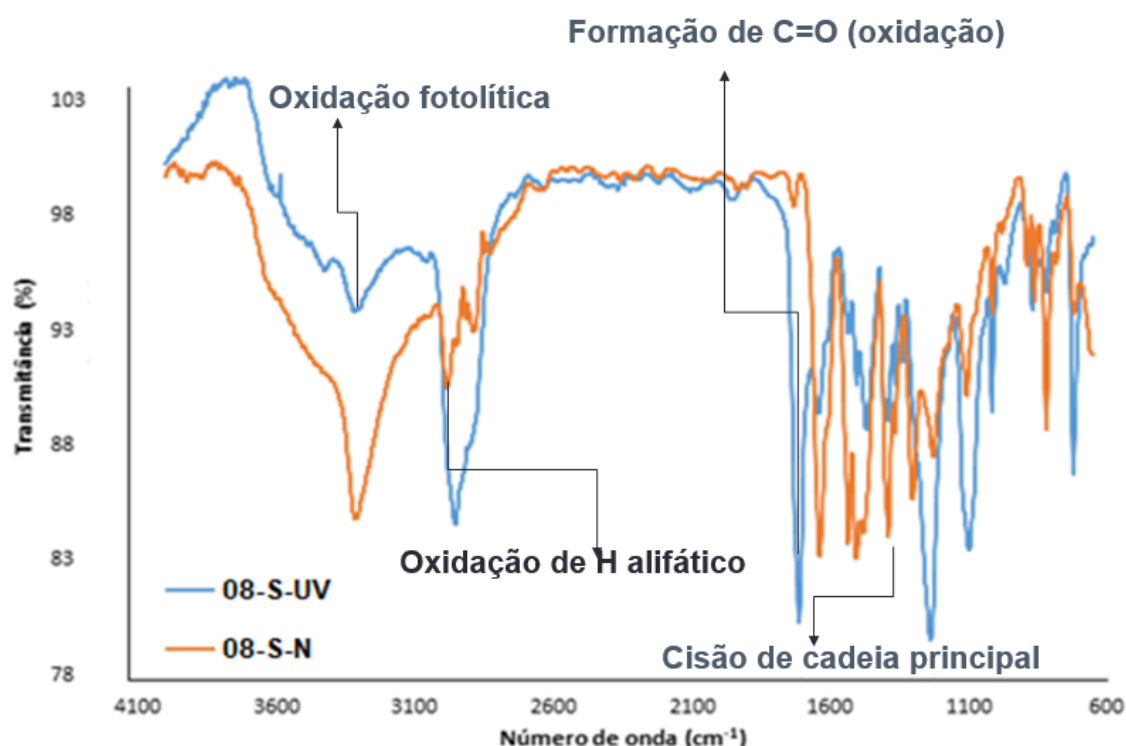


Figura 41 - Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®, uma não envelhecida e outra irradiada por UVC durante 1.100 horas

A Figura 42 apresenta a sobreposição dos resultados de espectroscopia de infravermelho da amostra 08-S-N e da amostra 08-PU-N, sendo que as duas amostras não passaram por qualquer processo de degradação. Essa figura tem por finalidade apresentar as diferenças de picos característicos do alvo apenas formado por Kevlar® daquele fabricado com a PU. Mudanças na forma de pico, em relação à amostra da aramida como recebido, notadas perto de 3330 cm^{-1} podem ser descritas pela presença de grupos hidroxila a 3370 cm^{-1} , também o grupo isocianato em torno de 2270 cm^{-1} foi adicionado na espectroscopia as e então a banda de 1510 cm^{-1} relacionada ao estiramento C=O e N-H em 1520 cm^{-1} , todos os grupos característicos da poliuretana (AZEVEDO, 2009). O reforço dos picos vizinhos a 2920 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} podem indicar respectivamente sobreposições tanto de estruturas N-OH da aramida e das ligações cruzadas uretânica quanto de hidrogênios alifáticos da aramida e PU.

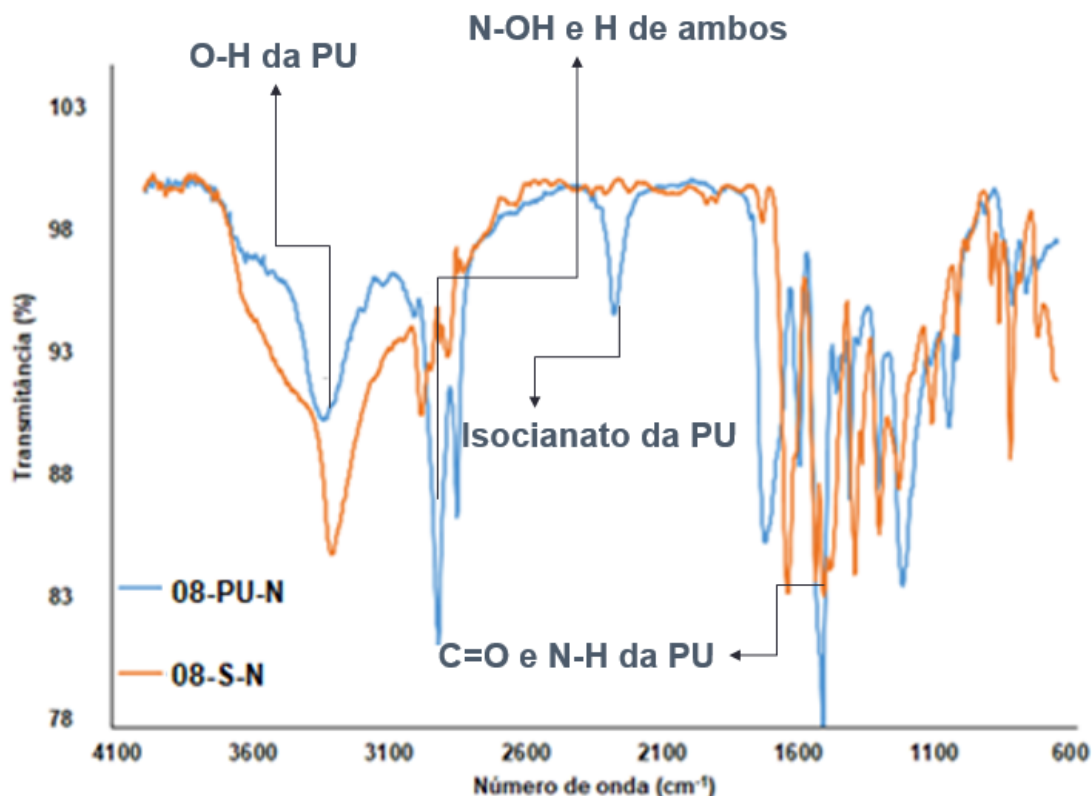


Figura 42 - Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras, uma de Kevlar[®] puro outra de Kevlar[®]/PU. Nenhuma das amostras foi envelhecida

Na Figura 43 visualiza-se a sobreposição dos resultados de espectroscopia de infravermelho de duas amostras de Kevlar[®]/PU, com e sem envelhecimento por UVC durante 1.100 horas. Alterações na intensidade e formato dos picos entre as amostras irradiadas e não irradiadas podem ser verificadas ao longo da sobreposição. O pico próximo à 3330 cm^{-1} mudou para um formato mais próximo ao característico do Kevlar[®] sem PU, reforçando a presença majoritária do estiramento N-H de um grupo amida.

A bandas próximas a 2920 cm^{-1} , típica de estiramentos de grupos CH, CH₂ e CH₃ (ANCHEYTA, TREJO, RANA, 2010), apresentaram diminuição de intensidade enquanto que a banda próxima a 2850 cm^{-1} , estiramento tipo C-H com um grupo carbonila (AZEVEDO, 2009) não apresentou alteração apreciável. O banda do grupo associada ao isocianato, 2270 cm^{-1} , desapareceu no espectro do compósito envelhecido, configurando-se em uma região em que quase não ocorreram sobreposições visíveis com o espectro do material não irradiado, podendo indicar a degradação frente ao agente de envelhecimento, assim como

a banda em 1720 cm^{-1} , estiramento C=O (ANCHEYTA, TREJO, RANA, 2010). O pico em 1510 cm^{-1} reduziu sua intensidade, indicando a diminuição dos estiramentos C=O e a oxidação de N-H.

É importante destacar na presente análise que o ensaio de FTIR por ATR colhe dados superficiais da amostra, levando à conclusão de que os picos menos pronunciados da aramida em relação aos da PU em 08-PU-N significam o efetivo recobrimento e proteção do tecido pela PU. Contrapõe-se assim com o quase desaparecimento dos picos da PU em 08-PU-UV com a predominância dos picos de aramida, indicando a maior degradação da PU que estava mais exposta superficialmente.

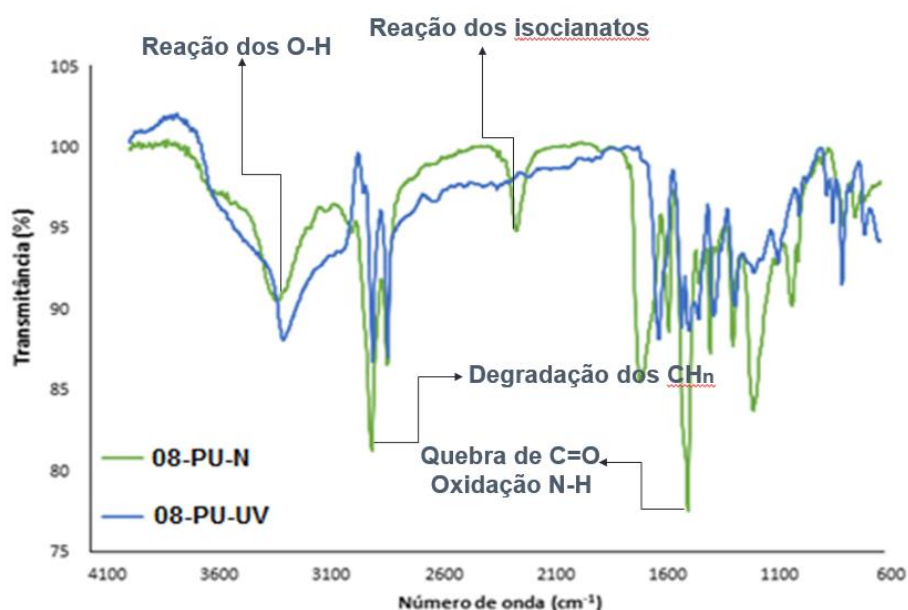


Figura 43 - Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR), modo transmitância, de duas amostras de Kevlar®/PU, uma não envelhecida e outra irradiada por UVC durante 1.100 horas

A Figura 44 traz a sobreposição de espectroscopia de infravermelho para amostras de aramida protegidas pelo invólucro de nylon/PVC, amostras 08-Ny-N e 08-Ny-UV, não irradiada e irradiada, respectivamente. As maiores mudanças quanto à degradação por UVC residem nas bandas próximas à 2920 cm^{-1} , 1280 cm^{-1} e 1070 cm^{-1} , características respectivamente de estruturas ácido-base OH-N e ligações inerentes à grupos éster (ANCHEYTA, TREJO, RANA, 2010), as quais diminuíram de intensidade pós envelhecimento.

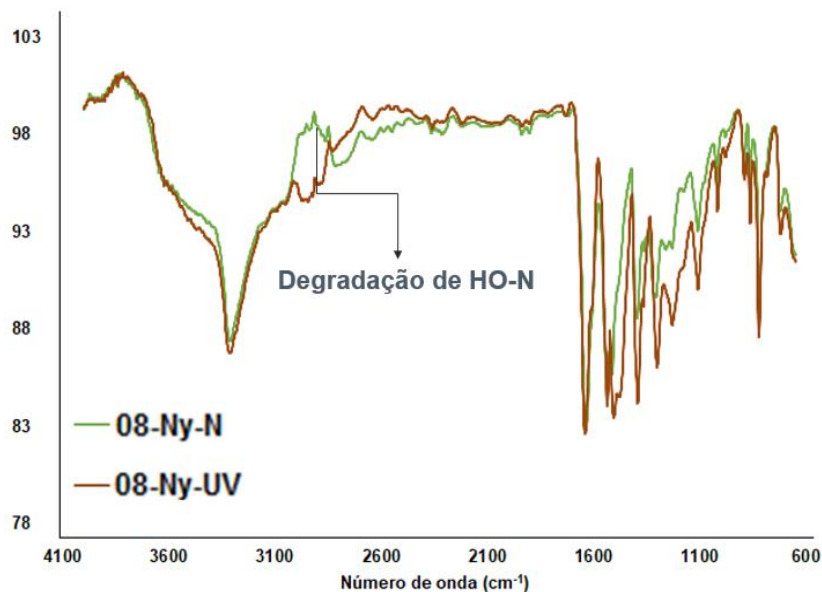


Figura 44 - Sobreposição de espectroscopia de infravermelho (FTIR) amostras de Kevlar® envolvidas por proteção de nylon, modo transmitância, uma não envelhecida e outra irradiada por UVC durante 1.100 horas

As maiores mudanças quanto à degradação por UVC residem nas bandas próximas à 2920 cm^{-1} , 1280 cm^{-1} e 1070 cm^{-1} , características respectivamente de estruturas ácido-base OH-N e ligações inerentes à grupos éster (ANCHEYTA, TREJO, RANA, 2010), as quais diminuíram de intensidade pós envelhecimento.

4.3. Grupo 2

Esse grupo tem por finalidade verificar os efeitos da mudança do número de lâminas de tecido no desempenho balístico com diferentes velocidades de referência. Estão compreendidas nos estudos do Grupo 2 de amostras os ensaios balísticos e as análises de fratura por Microscopia eletrônica de varredura.

4.3.1. Desempenho balístico

Dos ensaios balísticos realizados, foram mensuradas as profundidades de indentações e diâmetros de cavidade na plastilina versus as velocidades medidas pelas leituras das barreiras óticas, conforme pode-se ler na Figura 45.

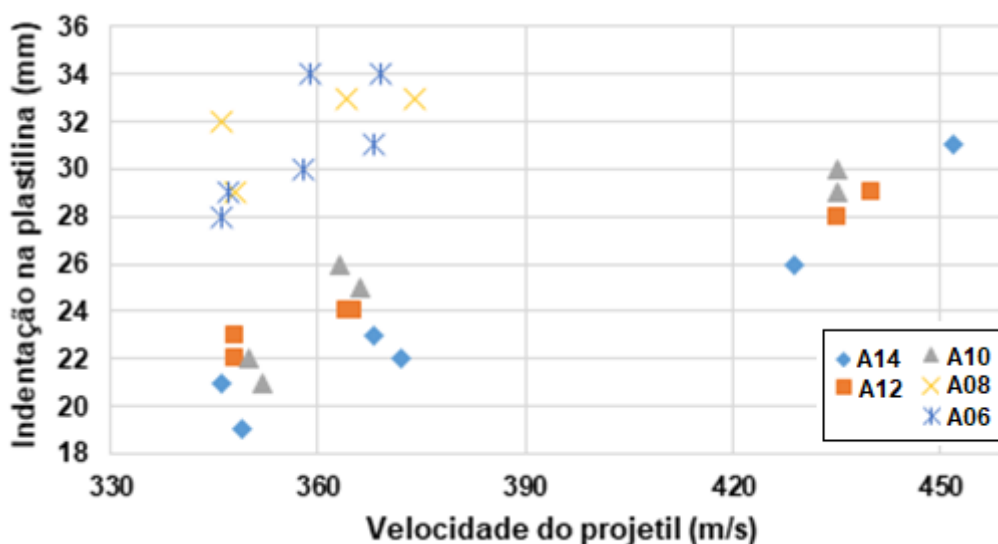


Figura 45 - Resultados dos ensaios balísticos relativos aos Grupo 2, relacionando indentação e velocidades

A amostra A08 sofreu duas perfurações a 431 m/s e 435 m/s (não sendo verificada a indentação na plastilina), 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 na amostra A06, 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.

Dos dados da Figura 45, verificam-se que ocorreram dois impactos fora dos limites da norma, tiro 1 da amostra A14 (452 m/s) e tiro 6 da amostra A10, mesmo assim, nos impactos em questão as amostras cumpriram os dois critérios avaliados.

É possível afirmar que as amostras A14, A 12 e A10 estão dimensionadas para todas as ameaças apresentadas, sendo que a amostra A14 a qual fora fabricada com maior número de lâminas, apresentou o melhor resultado quanto aos traumas balísticos, já que o maior 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 a amostra A10 tenha o pior desempenho balísticos, na velocidade de referência de 341 m/s (mesmo tendo sido ensaiada no teste balístico com a maior velocidade medida pelos sensores ópticos de 352

m/s) resultou em indentações menores que a amostra A12, que possui número maior de camadas de tecido.

As amostras A08 e A06 tem condições de proteger dois dos três níveis de blindagem, sendo que a amostra com oito lâminas de Kevlar® XP apresentou melhor desempenho para os disparos a $367 \text{ m/s} \pm 9 \text{ m/s}$. Novamente, na amostra com menor número de camadas mensuraram-se menores profundidades de indentações para a velocidade de impacto de $341 \pm 9 \text{ m/s}$. A amostra A06, com gramatura ligeiramente maior que a blindagem do experimento de Sohaimi, $3,06 \text{ Kg/m}^2$ contra $2,85 \text{ kg/m}^2$, apresentou desempenho balístico médio superior se comparado os $32,25 \text{ mm}$ deste experimento contra os $35,5 \text{ mm}$, considerando ainda que as velocidades de ensaio do o nível II da NIJ 0101.04 ($367 \text{ m/s} \pm 9$) são mais severas que o nível II da NIJ 0108.01 ($358 \text{ m/s} \pm 12$).

A Tabela 11 traz a comparação entre profundidade de indentação prevista pelo equacionamento presente ao Capítulo 3, utilizado para o dimensionamento inicial dos alvos balísticos. A Tabela 11 constitui-se do valor medido após ensaios balístico, a percentagem de erro entre o valor previsto e o medido.

Tabela 11 - Comparação entre indentação máxima teórica e indentação máxima real.

Amostra	Nível da NIJ 0101.04	Indentação máxima teórica (mm)	Indentação máxima aferida (mm)	Erro (%)
A14	III-A	31	31	0,0
	II	20	23	13,0
A12	III-A	35	29	-20,7
	II	23	24	4,2
A10	III-A	42	30	-40,0
	II	27	26	-3,8
	II-A	22	22	0,0
A08	II	32	33	3,0
	II-A	26	32	18,7
A06	II	40	34	-17,6
	II-A	33	29	-13,8
Erro médio				-5,2

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 na A 14 foi obtido pelo tiro realizado com à velocidade de 452 m/s, 7 m/s maior que o máximo desejável e permitido pela norma, sendo utilizado nos cálculos o valor de 445 m/s, máximo permitido pela NIJ 0101.04. Tem-se ainda que os maiores valores de erros, com módulo acima de 20 % ficaram relacionados ao nível III-A para as Amostras A12 e A10 desse grupo.

Erros intermediários na faixa de 10 a 20% incidiram com maior intensidade nas Amostras A08 e A06, no nível II-A para as duas amostras, no nível II para apenas a amostra com seis camadas. É importante salientar que pelo modelo teórico as endentações máximas nas Amostras A14 e A12 na menor velocidade de referência ficariam abaixo de 20 mm, o que não ocorreu já que as deformações máximas mensuradas ficaram acima 20 mm. O modelo prevê valores de segurança menores que os reais, porém, como as indentações finais afastaram-se na casa de 20 mm do máximo permitido pela norma, não se considera que acrescente riscos ao dimensionamento às blindagens.

Por meio do modelo também esperava-se falta de segurança acerca de disparos em $436 \text{ m/s} \pm 9 \text{ m/s}$, ou seja indentações acima de 46 mm acima do limite da NIJ 0101.04, e o que ocorreu de fato foi a perfuração no alvo de 8 lâminas, o que muito provavelmente ocorreria no de 6.

Tendo em vista os resultados obtidos com as amostras com PU, é possível verificar que o valor médio da indentação na amostra de doze lâminas (24 mm) à velocidade de referência de 367 m/s difere do valor médio de indentação da amostra Kevlar/PU seca (23,8 mm) em menos de 1% e que o máximo valor de indentação aferido nas duas amostras 08-PU-N e 08-PU-A (27 mm) diferiu em 1 mm do máximo verificado na amostra com dez camadas de Kevlar® XP S103. Obviamente seriam necessários um número maior de dados para as amostras com dez e doze lâminas de tecido de aramida pura para conduzir a uma análise comparativa mais segura. Além disto, verifica-se também que o erro médio da profundidade de indentação, medido no ensaio balístico é de - 5,2%, indicando que o método utilizado para o cálculo da profundidade se mostrou conservativo em relação ao valor medido no ensaio balístico.

Correlacionando o número de camadas de tecido das amostras (14, 12, 10, 8 e 6 lâminas) e as respectivas indentações na plastilina, para cada velocidade de referência, são obtidos os coeficientes presentes à Tabela 12

Tabela 12 – Correlação entre o laminado e a indentação na plastilina para cada velocidade de referência

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

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 profundidade de indentação e número de camadas. Contudo, 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 às referências presentes na fundamentação teórica. A Tabela 13 apresenta a correlação entre as velocidades de impactos medidas e a indentação, considerando os dados referentes para cada amostra separadamente.

Tabela 13 – Correlação entre velocidade de impacto e a indentação na plastilina para cada amostra

Amostra	Coeficiente de correlação	Interpretação
A14	0,96	Muito forte
A12	0,98	Muito forte
A10	0,93	Muito forte
A08	0,68	Moderada
A06	0,75	Forte

A correlação forte entre as velocidades de impacto e a indentação na plastilina apenas não se faz presente para Amostra A08, mais uma vez provavelmente pela menor quantidade de dados disponíveis, já que as medidas relativas ao nível III-A resultaram em perfurações. Os resultados comprovam que o trauma transmitido ao usuário poderá ser tanto maior quanto maior a energia. Na Figura 46 são apresentados os gráficos de dispersão para as amostras A14

camadas, A12 e A10, relacionando velocidade do projétil e a indentação na plastilina.

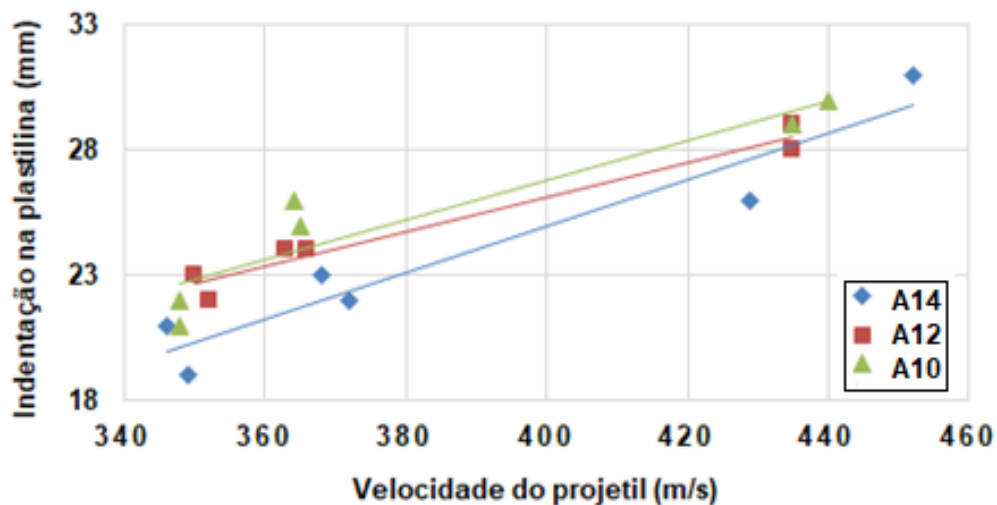


Figura 46 – Gráfico de dispersão, velocidade versus indentação, referentes às A14, A12 e A10

Pela observação é possível aproximar para a linearidade a relação entre indentação e velocidade do projétil nos três alvos apresentados. Nesta figura pode-se inferir, pela inspeção visual da distância dos pontos à reta de tendência, que os dados que mais aproximam-se da relação linear são os obtidos para a amostra A12, a que também possui, conseqüentemente, o maior coeficiente de correlação entre as grandezas velocidade e indentação.

Na Figura 47 têm-se os gráficos de dispersão para as amostras A08 e A06, que relacionam a velocidade do projétil e a indentação na plastilina.

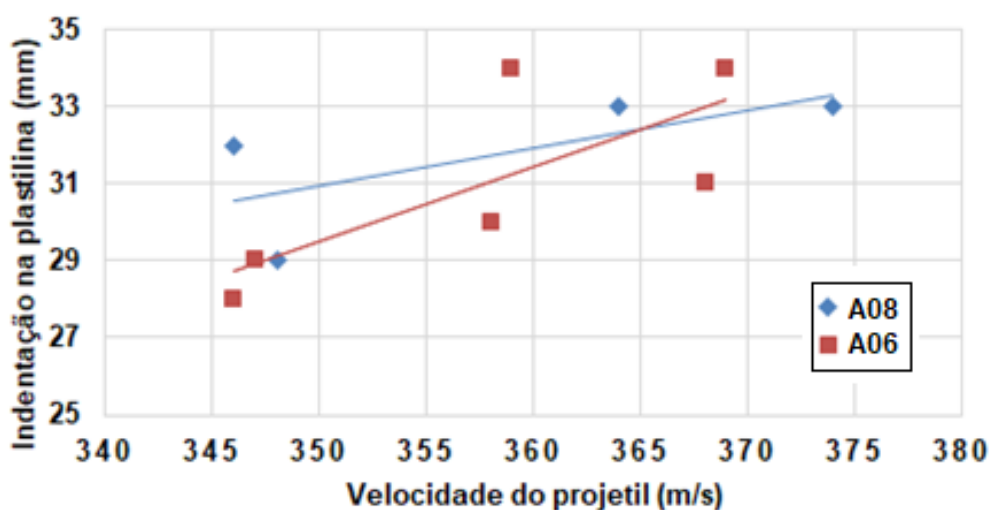


Figura 47 – Gráfico de dispersão, velocidade versus indentação, referentes às A08 e A06

Nesta figura, que agrupa as amostras com menores coeficientes de correlação, não se verifica a aproximação linear para os dois conjuntos de dados da mesma forma que ocorreu para as três amostras apresentadas na Figura 46. Ainda assim, os dados da amostra A08, aproximam-se mais da relação linear nas velocidades maiores, já para a amostra A06 a condição ocorre nas velocidades menores.

À Figura 48 estão dispostas as medições de diâmetro de cavidade com relação às velocidades do projétil.

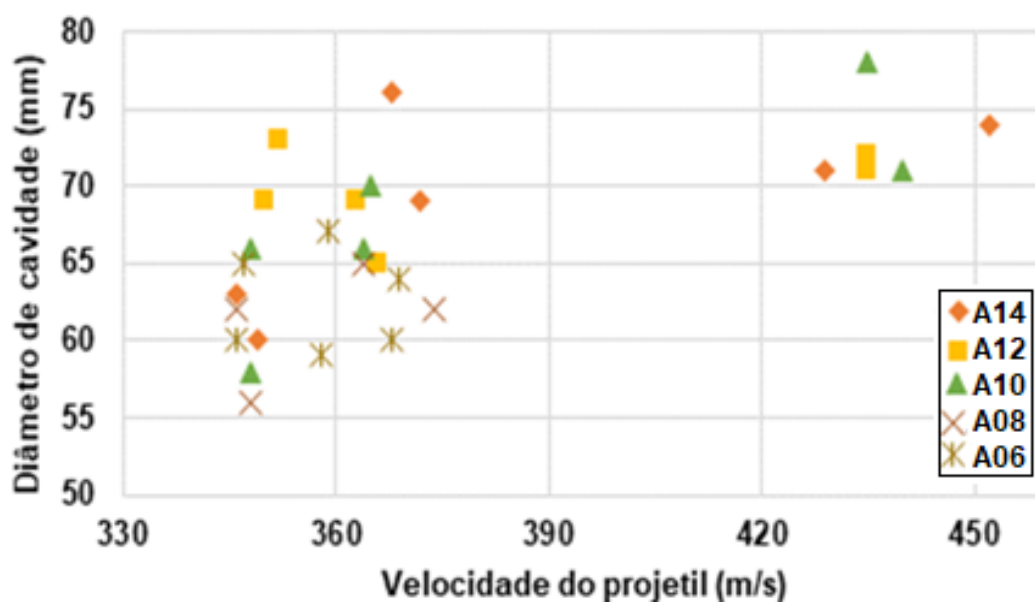


Figura 48 - Resultados dos ensaios balísticos relativos aos Grupo 2, relacionando diâmetro de cavidades e velocidades

Na Tabela 14, constam os coeficientes de correlação entre o número de lâminas de Kevlar® e o diâmetro de cavidade na massa, para cada tipo de velocidade de referência.

Tabela 14 - Correlação entre o número de camadas e o diâmetro de cavidade para cada velocidade de referência

Velocidade de referência	Coefficiente de correlação	Interpretação
436 m/s	-0,32	Fraca
367 m/s	0,78	Forte
341 m/s	-0,84	Forte

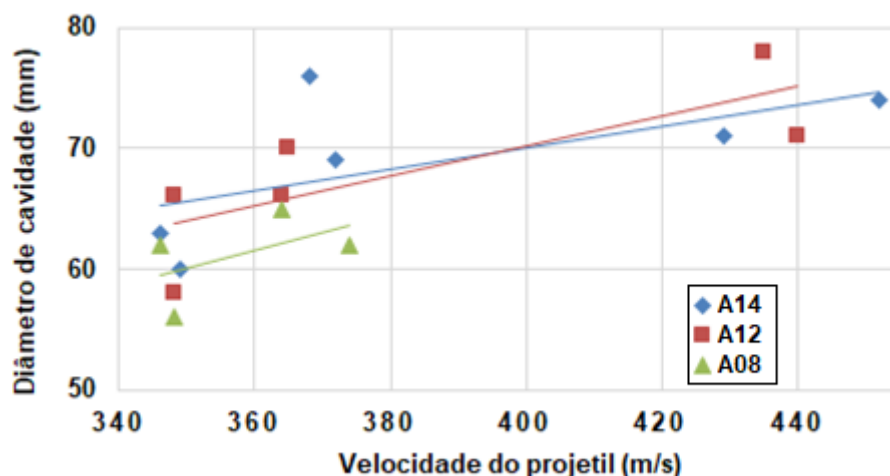
Tabela 15 apresenta a correlação entre a velocidade de impacto e diâmetro de cavidade em cada amostra.

Tabela 15 - Correlação entre velocidade de impacto e o diâmetro de cavidade para cada amostra

Amostra	Coefficiente de correlação	Interpretação
A14	0,63	Moderada
A12	0,35	Fraca
A10	0,79	Forte
A08	0,51	Moderada
A06	-0,01	Muito Fraca

Da Tabelas15 pode-se observar que a correlação entre o número de camadas de tecido possui influência na determinação do diâmetro de cavidade para impactos balísticos de projetis 9 mm nos níveis II-A e II da NIJ Standard 0101.04. Para a velocidade de referência do nível III-A não chega-se a uma correlação forte, porém o número reduzido de amostragem, assim como ocorreu na análise anterior, pode ter produzido a interferência na determinação do coeficiente. Já para o caso da influência da velocidade medida pelos cronógrafos, para cada tipo de amostra, é possível verificar correlação forte apenas para amostra A10, na amostra A06 não se tem qualquer correlação.

A Figura 49 apresenta gráfico de dispersão, velocidade do projétil versus diâmetro de cavidade, referentes às amostras A14, A10 e A08. Estes alvos foram agrupados no mesmo gráfico por apresentarem maiores coeficiente de correlação, ou seja, correlação forte e moderada.

**Figura 49** - Gráfico de dispersão, velocidade versus diâmetro de cavidade, referentes à amostra A14, A10 e A08

Da análise verifica-se que a relação de linearidade mais próxima é a da amostra A10, cujo coeficiente de correlação também é o maior. Para a A14 o ponto à 368 m/s afasta-se muito da reta de tendência, condição que afastou da correlação forte.

A Figura 50 traz o gráfico de dispersão, velocidade do projétil versus diâmetro de cavidade, da A12 e A06.

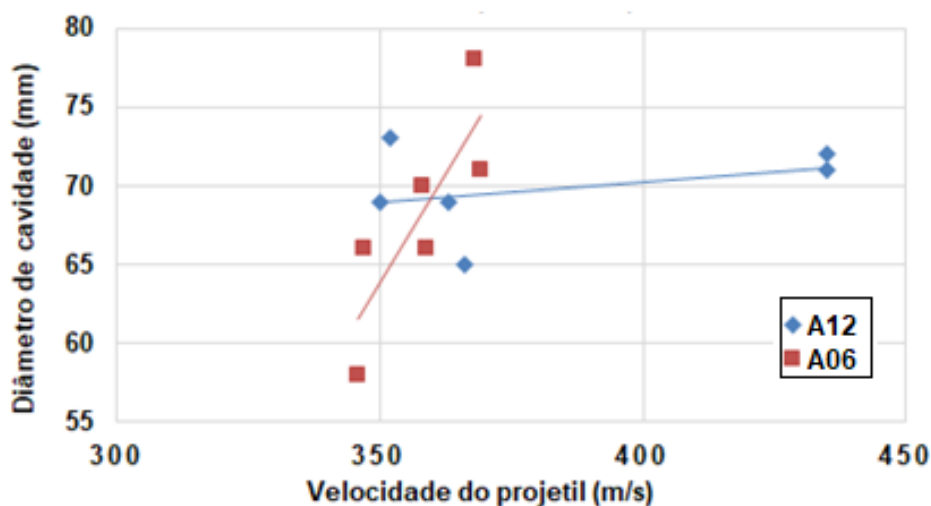


Figura 50 - Gráfico de dispersão, velocidade versus diâmetro de cavidade, referentes à A12 e A06

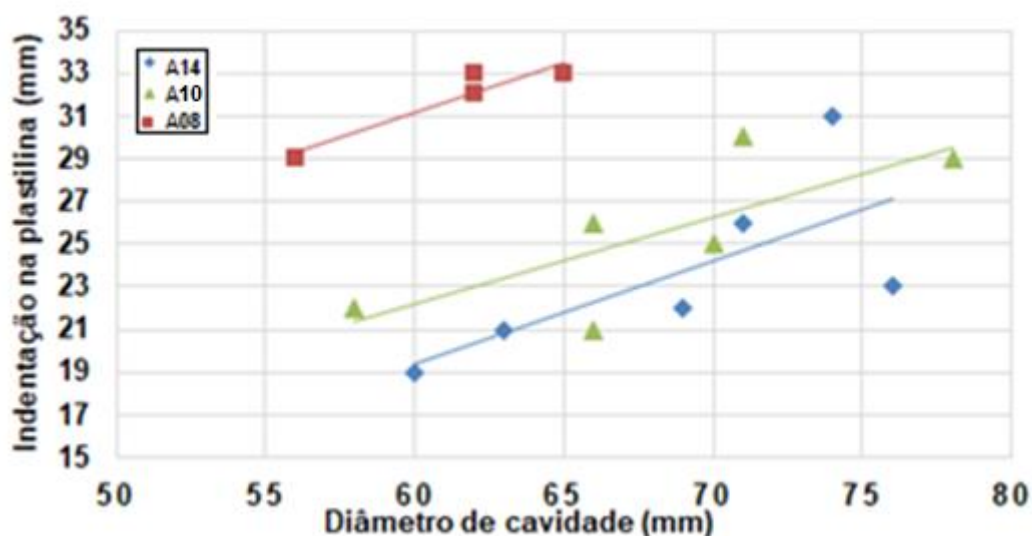
Destas amostras, que apresentaram coeficientes de correlação menores em relação às anteriores, possuem relação linear quando considerados os pontos à 350 m/s, 352 m/s, e 435 m/s para a A12 e para a A06 todos os pontos excetuando os verificados a 346 /s, 358 m/s e 368 m/s, ressaltando que a correlação para a A06 é muito fraca, sendo próxima à zero.

Na Tabela 16 estão presentes os coeficientes de correlação entre indentação na plastilina e o diâmetro de cavidade para cada amostra. O maior coeficiente de correlação ocorreu na amostra A08, alvo com menor número de dados, levando a suspeitar que caso mais dados fossem obtidos, este poderia cair. Cabe salientar que o único coeficiente que indicou correlação fraca foi a amostra A10, muito pelo efeito causado por um diâmetro de 73 mm em um impacto balístico com velocidade de 352 m/s.

Tabela 16 - Correlação entre indentação e o diâmetro de cavidade para cada amostra

Amostra	Coefficiente de correlação	Interpretação
A14	0,71	Forte
A12	0,25	Fraca
A10	0,75	Forte
A08	0,94	Muito Forte
A06	0,41	Moderada

A Figura 51 apresenta os gráficos de dispersão, diâmetro de cavidade versus indentação na plastilina, para as amostras A14, amostra A10 e amostra A08.

**Figura 51** - Gráfico de dispersão, diâmetro de cavidade versus indentação, referentes às amostras A14, A10 e A08

A amostra A08 com o maior coeficientes de correlação aproximou-se fortemente de uma relação linear, ficando ligeiramente fora da linha de tendência apenas o ponto com diâmetro de cavidade de 62 mm e indentação de 33 mm. Os pontos de diâmetro 66 mm e 71 mm na amostra A10 e 76 mm na amostra A14 foram os que mais se afastaram da linha de tendência. Apesar de dois pontos muito afastados da linha de tendência, os outros quatro pontos restantes à amostra A10 aproximaram-se muito da reta, fazendo com que sua correlação ficasse superior à da amostra A14, ainda que referente a este alvo dois pontos estivessem praticamente alinhados na reta de tendência.

Na Figura 52 observa-se o gráfico de dispersão associando diâmetro de cavidade versus indentação na plastilina, para as amostras A12 e amostra A06.

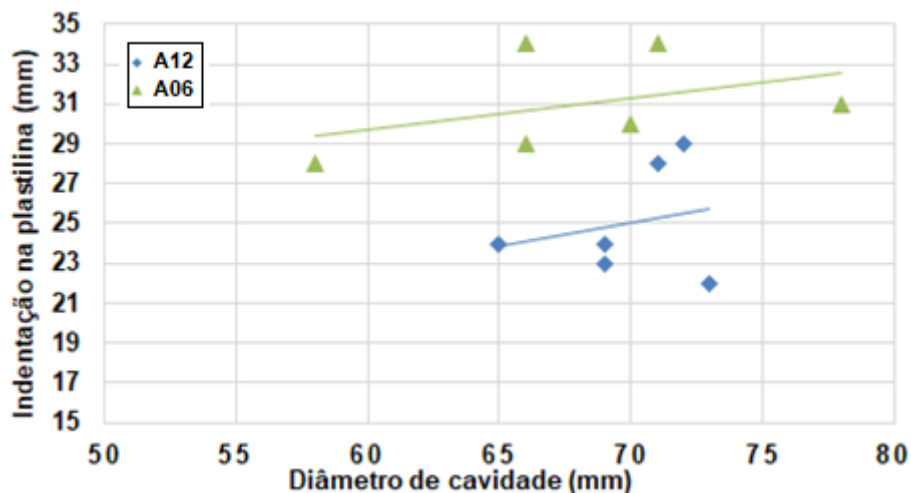


Figura 52 - Gráfico de dispersão, diâmetro de cavidade versus indentação, referentes à amostras A12 e amostra A06

Para a amostra A12, de correlação fraca entre as duas variáveis de interesse, os pontos de diâmetro de cavidade maiores que 71 mm afastaram-se muito da linha de tendência, enquanto que na amostra de correlação moderada A06, os pontos de diâmetro de cavidade de 66 mm e 71 mm de indentação 34 mm afastaram-se da região linear, ou seja, para as menores indentações na plastilina a relação de linearidade é mais pronunciada.

4.3.2 Análise de fraturas

Uma imagem com magnificação de 450 vezes da região de cone de deformação, ou seja, a parte posterior do alvo em contato com a plastilina, está representada na Figura 53.

Da imagem em questão verificam-se fraturas por estiramento e deformação por compressão irregular, indicando a transmissão da frente de onda pela espessura do alvo até a última lâmina em contato com a plastilina. A onda de choque provoca 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

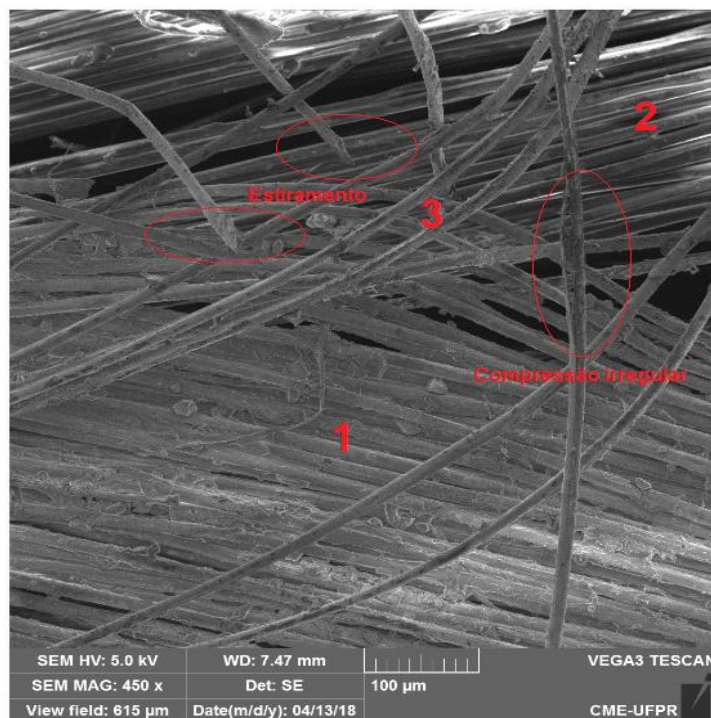


Figura 53 - Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra A06 em região cone de deformação, impacto a 347 m/s

Na Figura 54 está representada a última camada da amostra, impactada pelo disparo a 369 m/s, na região de cone de deformação, também em região de contato com a plastilina. Apesar da presença predominante de artefatos na amostras, muito devido à resíduos de queima de propelente, fragmentação do projétil ou plastilina incrustada. É possível visualizar regiões com desfibrilação generalizada e ainda setores em que a fibra de aramida sofreu deformação quasi-estática, não verificada nas análises anteriores. Muito embora impactada por um projétil com maior velocidade que a Figura 53, foi possível verificar o tipo de ruptura em questão, provavelmente decorrente da compressão por parte do penetrador em seu processo de parada ou pelo fato da frente de onda encontrar-se em estado desacelerado, o que a descaracterizaria como onda de choque. Nesse caso, foi verificada região contígua à perfuração do projétil para o impacto de maior velocidade.

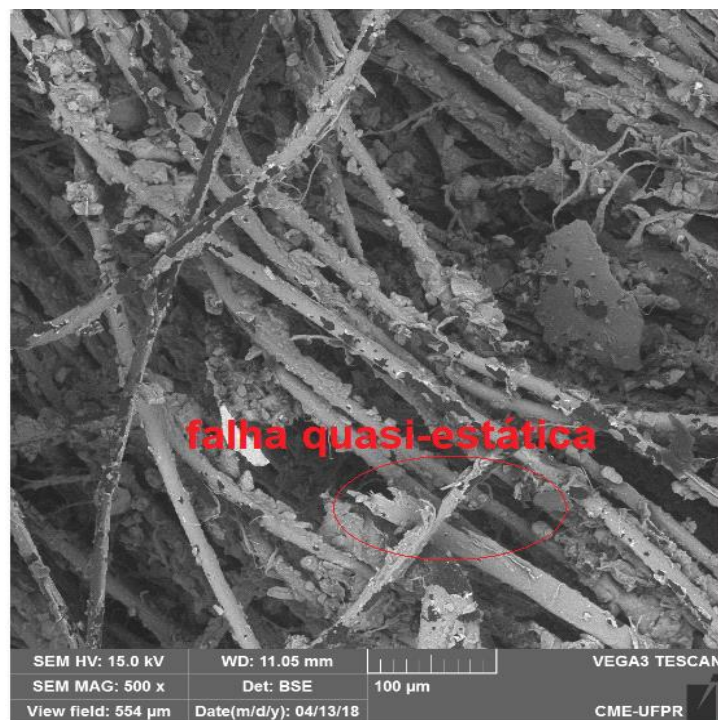


Figura 54 - Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra A06 em região cone de deformação, impactado a 369 m/s.

A Figura 55 apresenta análise de fratura da última camada da amostra A08, amostra que sofreu perfuração total nos disparos.

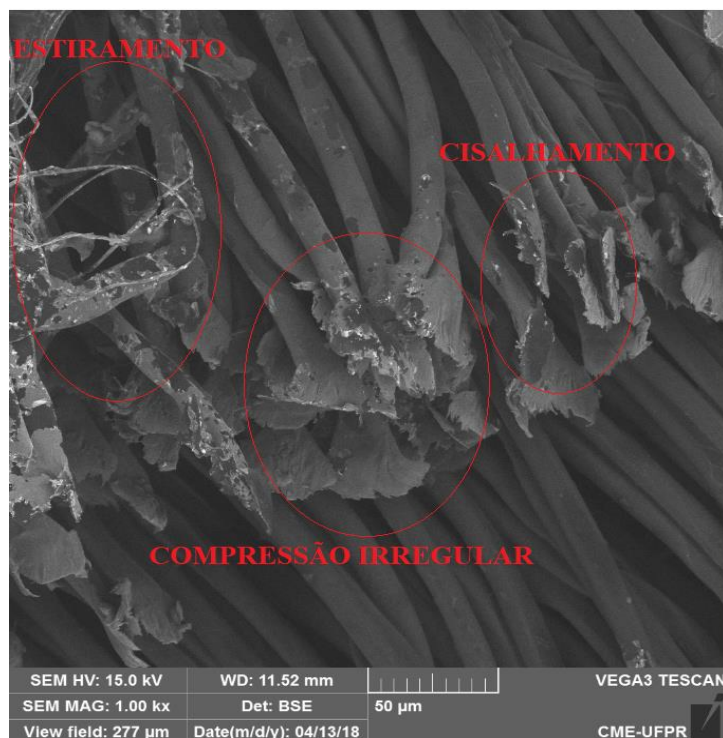


Figura 55 - Análise de fratura por MEV da oitava camada da amostra A08 em região próxima à perfuração do projétil à 435 m/s.

Na Figura 55 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. Nesse contexto, cabe ressaltar que em fios de Kevlar® KM2 o módulo elástico é maior que o módulo de cisalhamento (CHENG, CHEN, WEERASOORIYA, 2005). Isso pode resultar em mecanismo de dissipação menos eficiente e estando presente 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} do próprio alvo pode acarretar em perfuração das camadas, tendo em vista um fenômeno de dissipação de energia pelas fibras ocorrendo de maneira deficiente menos efetiva.

A Figura 56 mostra a sexta camada do A10, camada imediatamente subsequente à parada do projétil, em uma região próxima à diretamente comprimida, para o tiro número 2.

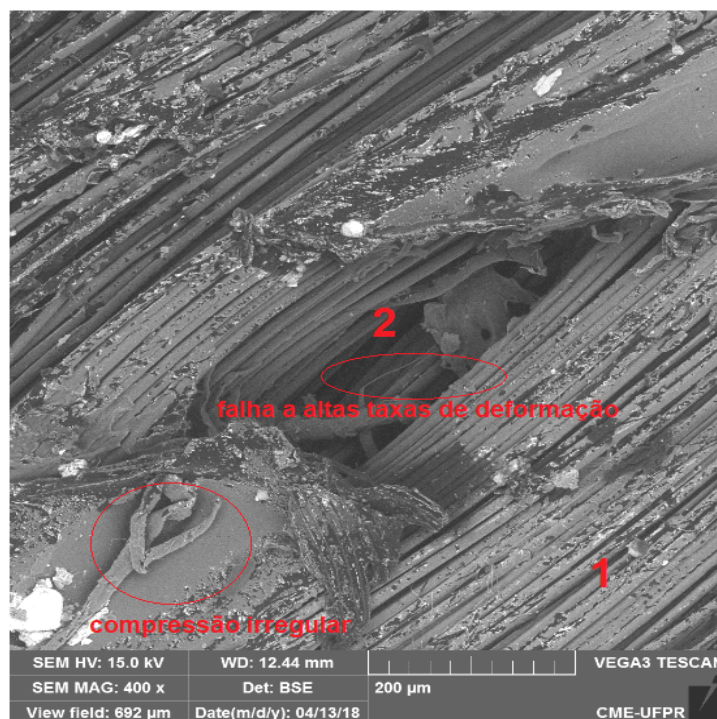


Figura 56 - Análise de fratura por MEV da sexta camada da amostra A10 em região de compressão do projétil deformado

Embora a qualidade da imagem possa ter sido prejudicada provavelmente por efeitos térmicos oriundos do atrito do projétil com a camada anterior, é possível verificar na Figura 55 regiões como a 1, em que o feixe de fibras ainda

encontra-se orientado e uma região 2, em que os feixes foram afastados entre si, inclusive apresentando característica de fibra fraturada a altas taxas de deformação em compressão transversal. Tais esforços podem ter sido oriundos da desaceleração do projétil na camada imediatamente anterior, assim como a compressão irregular também presente na imagem.

Na Figura 57 estão representadas as falhas na fibra referentes à quarta camada da amostra A12, imediatamente seguinte à que se deu a parada do projétil, em impacto numa velocidade de 435 m/s, em área de compressão do projétil.



Figura 57 - Análise de fratura por MEV da quarta lâmina da amostra A12 em região de compressão do projétil com velocidade de 435 m/s (tiro 1).

São discerníveis dois critérios de falha principais: por compressão irregular e estiramento. As falhas por estiramento no feixe de fibras representado ocorreu em maior número em relação à compressão irregular. Sabendo que a área expressa na Figura 56 não foi trespassada pelo projétil, já que este findou seu e ficou retido à camada anterior. É possível que as falhas por compressão irregular tenham sido geradas por ciclos de carregamento e descarregamento ao qual as fibras são solicitadas, já que o projétil deformou-se nas camadas anteriores, sofreu fragmentações e desacelerou seu movimento. Outro fator a

ser lembrado reside no fato de que a lâmina recebe também a frente de onda transmitida que desloca-se no sentido axial da fibra, gerando esforços de estiramento e outros esforços mecânicos de natureza distinta daquela gerada pela compressão da munição deformada. Pode-se verificar algumas fibras contidas em uma região de transição, na que as fibras não possuem mecanismo de fraturas em que suas características são definidas por observação imediata. Desta condição, pode-se classificar estas fibras em um estado intermediário entre os mecanismos de estiramento e compressão irregular, ou catalogar em um estágio em que os efeitos produzidos são concomitantes e contribuem igualmente para deformação e rompimento das fibras.

A Figura 58, mostra fratura das fibras de aramida, na camada terminal da amostra A14 impactada à 452 m/s. De acordo com a imagem é possível visualizar esforços torcionais, o qual poderia desencadear fratura por cisalhamento da fibra, o que não ocorreu em um estágio completo.

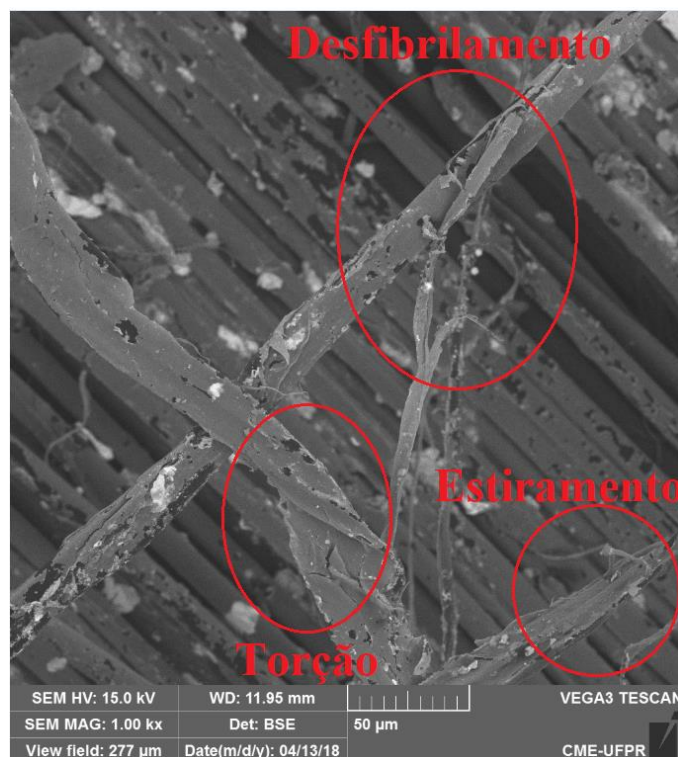


Figura 58 - Análise de fratura por MEV da quinta camada da amostra A14 em região sob a ação direta do projétil em disparo a 452 m/s

Porém verifica-se que falhas por estiramento ocorreram em estágio completo, inclusive com a presença de fratura com desfibrilamento axial, muito devido à desaceleração do projétil em estado avançado ou pela frente de onda

transmitida também encontrar-se bastante atenuada, já que a parada da munição deu-se na camada anterior. Ainda assim, a transmissão de energia continuou por meio da espessura restante até atingir a plastilina e deformá-la.

5. CONCLUSÕES

Dos resultados presentes neste trabalho primeiramente pode-se concluir que a dispersão é elevada indicando a necessidade da realização de um maior número de ensaios, bem como é extremamente importante medir a velocidade do projétil. Também verifica-se a necessidade de se estabelecer a possível faixa de variação das profundidades de indentação na plastilina.

A literatura aponta para diminuição de v_{th} para blindagens que utilizam resinas, em comparação com alvos que contenham somente tecido e gramaturas. Contudo, há indícios de que não ocorra a mesma queda de desempenho na avaliação da indentação da plastilina, para amostras com e sem matrizes de gramaturas próximas. O acréscimo de mecanismos de dissipação de energia no caso do acréscimo de PU ao laminado produziu aumento de performance, uma vez que o valor médio das indentações para as amostras Kevlar®/PU coincidiu com a média de alvo puro tecido e inclusive em blindagens de gramatura superior. A proteção pela PU não protege totalmente o laminado, seja da ação da água, seja do UVC conforme mostrado no exame do FTIR, porém o fato não acarreta em alteração de desempenho mecânico aparente na imersão em água e acarreta menor perda de performance em relação a invólucro comumente utilizado.

Ainda é possível inferir que em impactos cuja velocidade do projétil se aproxima da velocidade mínima estimada para perfuração completa da blindagem (v_{th}) o modo de falha por cisalhamento torna-se mais evidente em relação a outros modos de falha, muito embora o modo de falha das fibras se altere a cada lâmina de tecido perfurado. Ainda, verifica-se incidência de falhas quasi-estáticas em regiões de camadas subsequentes a de parada do projétil em que tanto este quanto a frente de onda teoricamente encontram-se com velocidades mais atenuadas. Pelo ensaio de FTIR foram verificadas alterações na estrutura química da aramida, como quebras nas ligações terminais e na cadeia principal, que originariam pontos de fragilidade para fraturas por defeito prévio.

A medida de diâmetro de cavidade pelo método descrito ao longo do trabalho não apresenta resultados totalmente confiáveis. Sua conversão deve ser utilizado, com ressalvas, pois não representam os valores reais, muito

embora não sejam critério de avaliação pela norma de referência. Os valores teóricos referentes à indentação na plastilina, ainda que extraídos da conversão, podem nortear o dimensionamento de alvos balísticos conforme procedido no trabalho. A obtenção de profundidades de indentação maiores que as reais, se considerado o modelo descrito no capítulo 3, são satisfatórios uma vez que colocam limites teóricos não alcançados no ensaio real, gerando assim, coeficientes de segurança satisfatórios. Ou seja, o modelo ao reverter valores maiores que os reais, e menores que os 44 mm normalizados, gera riscos de projeto menores pois trabalha-se abaixo do limite.

Porém há que se considerar as limitações do modelo, já que em impactos de nível III-A os limites teóricos apresentaram índices de erros maiores em comparação ao que se mediu, incorrendo em riscos ao projetista que poderá super dimensionar uma proteção balística.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, incluindo temas que não puderam ser abarcados nessa dissertação, podem-se elencar:

- Teste de impacto balístico em amostras compósitas de Kevlar/PU com a variação dos níveis balísticos sendo também procedida a mudança do número de camadas associadas, como 4, 6, 8 e 10 para os níveis II-A, II e III-A, por exemplo, com o acréscimo ainda das munições 40 Smith & Wesson, 357 Magnum e 44 Magnum.
- Determinação do limite balístico de amostra Kevlar/PU e amostra de tecido puro, sendo as duas amostras de gramaturas próximas;
- Teste de amostras de tecido puro mais poliuretana ante ao envelhecimento por dois agentes simultâneos (imersão em água e irradiação por UVC), com a simulação de desgaste por uso;
- Aumento do laminado compósito (maior que 20 kg/m²) e teste no nível III da *NIJ Standard 0101.04* e/ou mesmo utilização de calibres especiais (5,56 mm).
- Uso de cerâmica de alto desempenho, como a de carbeto de silício (SiC), na forma de placas de proteção balística, juntamente com alvos de Kevlar[®]/PU. Sendo desejável testar o desempenho balísticos no nível III da *NIJ Standard 0101.04* e de calibres especiais (5,56 mm).

7. REFERÊNCIAS

_____. BRASIL. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA NR 88/2016. Exército Brasileiro. Brasília. 2016.

_____. USA. Ballistic Resistance of Personal Body Armor NIJ 0101.04. National Institute of Justice. September. 2000.

_____. USA. Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons. Technical Manual-5-855-1, Headquarters Department of the Army Washington, 1986.

_____. USA. MILITAR STDANDARD-662F. V50 Ballistic Test for Armor, Washington, v. 18, 1997.

_____. USA. AEP-2920. Procedures for the Evaluation and Classification of Personal Armour. Bullet and Fragmentation Threats. NATO Standardization Agency. 2014.

AFSHARI, M.; CHEN, P.; KOTEK, R. Relationship between tensile properties and ballistic performance of poly (ethylene naphthalate) woven and nonwoven fabrics. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 125, n. 3, p. 2271-2280, 2012.

ALANKAYA, V., SENYILMAZ, K., TURKER, M. Inspection of Failure Caused by Ballistic Impact on Body Armors Composed of Laminated Dyneema™. **Gazi University Journal of Science**, v. 26, n. 2, p. 253-259, 2013.

ANAGREH, N.; DORN, L.; BILKE-KRAUSE, C. Low-pressure plasma pretreatment of polyphenylene sulfide (PPS) surfaces for adhesive bonding. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 28, n. 1, p. 16-22, 2008.

ANCHEYTA, J.; TREJO, F.; RANA, M. S. **Asphaltenes: chemical transformation during hydroprocessing of heavy oils**. CRC press, 2010.

ARAÚJO, M., CASTRO, E.M.M. **Manual de Engenharia Têxtil. Vol.1**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

AWERBUCH, J.; BODNER, S. R. Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates. **International Journal of Solids and Structures**, v. 10, n. 6, p. 671-684, 1974.

AZEVEDO, Elaine Cristina de. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná. 2009.

BAZHENOV, 3 S. Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric. **Journal of materials science**, v. 32, n. 15, p. 4167-4173, 1997.

BEHERA, B.K.; HARI, P. K. **Woven textile structure**. Cambridge: The Textile Institute and Woodhead Publishing, 2010.

BHATNAGAR, A. (Ed.). **Lightweight ballistic composites: Military and law-enforcement applications**. Cambridge: Woodhead Pub Limited, 2006.

BIBO, G. A.; HOGG, P. J. The role of reinforcement architecture on impact damage mechanisms and post-impact compression behaviour. **Journal of Materials Science**, v. 31, n. 5, p. 1115-1137, 1996.

BITTENCOURT, G.A. **Efeito da radiação gama em blindagens balísticas compósitas de poliaramida**. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia. 2011.

BILLON, H. H.; ROBINSON, D. J. Models for the ballistic impact of fabric armour. **International Journal of Impact Engineering**, v. 25, n. 4, p. 411-422, 2001.

BOUKOUVALAS, N.T.; WIEBECK, H. Caracterização térmica de fios de poliaramida. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 4, p. 284-288, 2007.

CANNON, L. Behind armour blunt trauma-an emerging problem. **Journal of the Royal Army Medical Corps**, v. 147, n. 1, p. 87-96, 2001.

CANGEMI, J. M., SANTOS, A. M., e CLARO NETO, S. A Revolução Verde da Mamona. **Química Nova na Escola**, 2010. p: 3-7.

CARDOSO, A. L. V. Caracterização dinâmica por impacto de cerâmicos à base de alumina. **Caracterização dinâmica por impacto de cerâmicos à base de alumina**, Tese de doutorado, Instituto Militar de Engenharia, 2005.

CHENG, M.; CHEN, W.; WEERASOORIYA, T. Mechanical properties of Kevlar® KM2 single fiber. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 127, n. 2, p. 197-203, 2005.

CLARO NETO, S. C. **Caracterizações físico-química de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.1997.

COOK, J. G. **Handbook of textile fibres: man-made fibres**. Elsevier, 1984.

CUNNIFF, P. M. Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. In: **Proceedings of the 18th International and Symposium on Ballistics**. 1999. p. 1303-1310.

DAVIS, R.; CHIN, J.; LIN, C.; PETIT, S. Accelerated weathering of polyaramid and polybenzimidazole firefighter protective clothing fabrics. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, p. 1642-1654, 2010.

DEROMBISE, G., VOUYOVITCH VAN SCHOORS, L., MESSOU, M. F., DAVIES, P. Influence of finish treatment on the durability of aramid fibers aged under an alkaline environment. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 117, n. 2, p. 888-898, 2010.

DOWNING, J. W. J.; NEWELL J. A. Characterization of structural changes in thermally enhanced Kevlar-29 fiber. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 91, p. 417-424, 2004.

DU PONT. **Du Pont Kevlar® XP™ S103 Product Specification**. 2013. Link: http://www.dupont.com/content/dam/dupont/productsandservices/fabricsfibersandnonwovens/fibers/documents/DSP_Kevlar_XPS103_datasheet_K23846_2.pdf. Acesso em meio de 2018.

DU PONT. **Kevlar® Aramid Fiber Technical Guide**. 2010. Link: http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabricsfibers-and-nonwovens/fibers/documents/Kevlar_Technical_Guide.pdf. Acesso em maio de 2018.

FORSTER, A. L.; PINTUSX, P.; MESSIN, G. H. R.; RILEY, M. A.; PETIT, S.; ROSSITER, W.; CHIN, J.; RICE, K. D.; FORSTER, A. L. Hydrolytic stability of polybenzobisoxazole and polyterephthalamide body armor. **Polymer degradation and stability**, v. 96, n. 2, p. 247-254, 2011.

GOPINATH, G.; ZHENG, J. Q.; BATRA, R. C. Effect of matrix on ballistic performance of soft body armor. **Composite Structures**, v. 94, n. 9, p. 2690-2696, 2012.

GRIGORYAN, V. A.; KOBYLKIN, I. F.; BESPALOV, I. A. Comparative evaluation of ballistic resistance of textile armor packages against steel and lead bullets. **Techniczne Wyroby Włókiennicze**, v. 17, p. 58-63, 2009.

GUOQI, Z.; GOLDSMITH, W.; DHARAN, C. K. H. Penetration of laminated Kevlar by projectiles—II. Analytical model. **International Journal of Solids and Structures**, v. 29, n. 4, p. 421-436, 1992.

HANLON, E.; GILLICH, P. Origin of the 44-mm behind-armor blunt trauma standard. **Military medicine**, v. 177, n. 3, p. 333-339, 2012.

HAZELL, Paul J. **Armour: Materials, Theory, and Design**. CRC Press, 2015.

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.

JACOBS, M. J. N.; VAN DINGENEN, J. L. J. Ballistic protection mechanisms in personal armour. **Journal of Materials Science**, v. 36, n. 13, p. 3137-3142, 2001.

JUSSILA, J., LEPPÄNIEMI, A., PARONEN, M., e KULOMÄKI, E. Ballistic skin simulatant. **Forensic science international**, v. 150, n. 1, p. 63-71, 2005.

JUSTO, J. M. C. F. **Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos**. Tese de Doutorado. Universidade do Porto. 2005.

KIM, P. K.; HSU, S. L.; ISHIDA, H. Normal vibrational analysis of benzanilide. A model for poly (p-phenylene terephthalamide). **Macromolecules**, v. 18, n. 10, p. 1905-1914, 1985.

KIRKWOOD, K. M. KIRKWOOD, J. E.; LEE, Y. S.; EGRES, J. R. R. G., WAGNER, N. J.; WETZEL, E. D. Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar® KM-2 fabric: part II: predicting ballistic performance. **Textile research journal**, v. 74, n. 11, p. 939-948, 2004.

KONG, H.; MOURITZ, A. P.; PATON, R. Tensile extension properties and deformation mechanisms of multiaxial non-crimp fabrics. **Composite Structures**, v. 66, n. 1-4, p. 249-259, 2004.

LAWRENCE, C. A. **Fundamentals of spun yarn technology**. CRC Press LLC, 2003.

LI, S.; GU A.; XUE, J.; LIANG, G.; YUAN, L. The influence of the short-term ultraviolet radiation on the structure and properties of poly (p-phenylene terephthalamide) fibers. **Applied Surface Science**, v. 265, p. 519– 526, 2013.

LI, Y.; LI, C., ZHENG, J., ZHOU, H.; LUO, Y.; HUANG, X. I. Effects of water on the ballistic performance of para-aramid fabrics: three different projectiles. **Textile Research Journal**, v. 86, n. 13, p. 1372-1384, 2016.

LIM, J.; ZHENG, J. Q.; MASTERS, K.; CHEN, W. W. Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers. **International Journal of Impact Engineering**, v. 38, n. 4, p. 219-227, 2011.

LIMA, J. E. S. **Estudo e desenvolvimento de argamassa elastomérica com base uretânica**. Dissertação de mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 2001.

LOIOLA JUNIOR, E. O; FERREIRA, N. **Histórico e evolução do colete balístico**, 2016. Link: http://www.academia.edu/28397426/HISTORICO_E_EVOLUÇÃO_DO_COLETE_BALÍSTICO, acesso em maio de 2018.

MEAD, J. W.; MEAD, K. E.; AUERBACH, I.; ERICKSEN, R. H. Accelerated ageing of Nylon 66 and Kevlar 29 in elevated temperature, elevated humidity, smog, and ozone. **Industrial and engineering chemistry Product Research and Development**, v. 21, n. 2, p. 158-163, 1982.

MEYERS, M. A. **Dynamic Behavior of Material**. New York: Jhon Wiley & Sons, 1994.

MONTEIRO, P., **Avaliação do Desempenho de Blindagens na Proteção de Pessoas e Equipamentos**, Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, 2007.

MORYE, S. S.; HINE, P. J.; DUCKETT, R. A.; CARR, D. J.; & WARD, I. M. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 14, p. 2631-2642, 2000.

NAIK, N. S.; NAIR, N. S.; KUMAR, C. V. S.; NAIK, N. K. Ballistic impact performance of composite targets. **Materials & Design**, v. 51, p. 833-846, 2013.
NAIK, N. K.; SHRIRAO, P.; REDDY, B. C. K. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Parametric studies. **Materials Science and Engineering**, v. 412, n. 1, p. 104-116, 2005.

NAIK, N. K.; SHRIRAO, P. Composite structures under ballistic impact. **Composite structures**, v. 66, n. 1, p. 579-590, 2004.

NAKAI, N.; MURATA, M.; NAGAHAMA, M.; HIRASE, T.; TANAKA, M.; FUJIKAWA, T.; KAWANISHI, S. Oxidative DNA damage induced by toluene is involved in its male reproductive toxicity. **Free radical research**, v. 37, n. 1, p. 69-76, 2003.

NASCIMENTO, R. F. **Influência do intemperismo no desempenho mecânico e balístico de tecido produzido com fibra de aramida**. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia. 2014.

NAZARÉ, S., DAVIS, R. D., PENG, J. S., & CHIN, J. **Accelerated Weathering of Firefighter Protective Clothing: Delineating the Impact of Thermal, Moisture, and Ultraviolet Light Exposures**. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2012.

OWENS CORNING. **Multiaxial Non-Crimp Fabric (NCF) Reinforcements**. 2014. Link: <https://dcpd6wotaa0mb.cloudfront.net/mdms/dms/CSB/10018955/10018955--Multiaxial-NCF-brochure.pdf>. Acesso em maio de 2018.

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**, v. 82, n. 6, p. 542-557, 2012.

PINTO, J. M. G. T. **Avaliação do comportamento mecânico de blindagens balísticas**. Dissertação de mestrado. Universidade do Porto. 2009.

PLEPIS, A. **Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1991.

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 em maio de 2018.

SEGAL, C. High-performance organic fibers, fabrics, and composites for soft and hard armor applications. In: **International SAMPE Technical Conference, 23rd, Kiamesha Lake, NY**. 1991. p. 651-660.

SOHAIMI, R. M.; ANI, A.; ISHAK, S. A. F. M.; YAHAYA, R. Effect of stitching parameters on ballistic resistance of kevlar fabrics. **Science & technology research institute for defense**, p. 53, 2016.

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. In: **Proc. 19th SAMPE International Technical. Conference.** 1987. p. 108-119.

VALENÇA, S. L. **Estudo de envelhecimento e propriedades mecânicas de compósito epóxi reforçado com tecido plano de kevlar e híbrido vidro/kevlar.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Sergipe. 2014.

WALKER, J. D. Ballistic limit of fabrics with resin. In:TB46, **Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics**, Interlaken, Switzerland, May. 2001. p. 7-11.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia.** São Paulo, Editora Artliber, 2005.

YANG, H. H. **Kevlar aramid fiber.** Wiley, 1993.

ZHANG, Y. H.; ZHANG, J.; CHEN, J.; HAO, X.; WANG, S.; FENG, X; GUO, Y. Effects of solar UV irradiation on the tensile properties and structure of PPTA fiber. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91 p 2761 – 2767, 2006

**APÊNDICE A-RESULTADOS DOS ENSAIOS BALÍSTICOS DOS GRUPO 1 E
GRUPO 2**

Tabela 17 – Resultados dos ensaios balísticos para o Grupo 1 (a)

Nome da Amostra	Número do disparo	Velocidade de impacto (m/s)	Indentação na plastilina (mm)
08-S-N	1	377	28
	2	361	29
	3	376	31
	4	367	30
	5	373	30
	6	377	31
08-S-A	1	381	--
	2	354	--
	3	370	--
	4	376	--
	5	357	--
	6	366	--
08-PU-N	1	358	23
	2	358	26
	3	355	25
	4	368	20
	5	364	22
	6	367	27
08-PU-A	1	363	24
	2	358	25
	3	365	22
	4	365	26
	5	370	26
	6	367	19

Tabela 18 – Resultados dos ensaios balísticos para o Grupo 1 (b)

Nome da Amostra	Número do disparo	Velocidade de impacto (m/s)	Indentação na plastilina (mm)
08-S-UV	1	370	36
	2	371	38
	3	374	38
	4	374	41
	5	371	34
	6	375	35
08-PU-UV	1	379	27
	2	367	24
	3	372	26
	4	371	28
	5	370	28
	6	370	25
08-Ny-N	1	371	33
	2	375	30
	3	370	33
	4	365	31
	5	371	32
	6	369	31
08-Ny-UV	1	365	34
	2	364	31
	3	376	38
	4	368	34
	5	372	36
	6	367	36

Tabela 19 – Resultados dos ensaios balísticos para o Grupo 2

Nome da Amostra	Número do disparo	Velocidade de impacto (m/s)	Indentação na plastilina (mm)	Diâmetro de cavidade (mm)
A14	1	452	31	74
	2	429	26	71
	3	372	22	69
	4	368	23	76
	5	346	21	63
	6	349	19	60
A12	1	435	29	72
	2	435	28	71
	3	363	24	69
	4	366	24	65
	5	350	23	69
	6	352	22	73
A10	1	440	30	71
	2	435	29	78
	3	364	26	66
	4	365	25	70
	5	348	22	58
	6	348	21	66
A08	1	431	--	--
	2	435	--	--
	3	364	33	65
	4	374	33	62
	5	348	29	56
	6	346	32	62
A06	1	369	34	64
	2	368	31	60
	3	359	34	67
	4	358	30	59
	5	346	28	60
	6	347	29	65