



Póster presentado en:

XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. 9-11 noviembre 2016. Elche (Alicante)



Financiación: Proyecto RTC-2015-3887-8. Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad (Ministerio de Economía y Competitividad y el Programa FEDER 2014-2020).



Análisis experimental de la resistencia a la penetración de cuchillo en tejidos de alto rendimiento

M. Rodríguez Millán¹, T. Ito Gonzales², J.A Loya Lorenzo², I. Rubio Díaz¹, M. Marco Esteban¹, H. Miguélez Garrido¹

¹Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. mrmillan@ing.uc3m.es, igrubiod@pa.uc3m.es, mimarcoe@ing.uc3m.es, mhmiguel@ing.uc3m.es

²Dpto. de Ingeniería Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid. jloya@ing.uc3m.es, tito@pa.uc3m.es

En este trabajo se ha llevado a cabo ensayos experimentales para determinar la eficacia de dos tipos de tejidos de aramida frente a una penetración de cuchillo. El tipo de tejido es un parámetro fundamental a la hora de fabricar una protección personal como se ha demostrado en este trabajo. Para medir la eficiencia de cada tipo de tejido, se ha fabricado gelatina balística de modo que el ensayo sea lo más real posible. El trauma producido en la gelatina y el modo de fallo de las diferentes telas son analizados con el fin analizar profundamente. Se ha demostrado que las telas de aramida impregnadas con resina termoplástica producen una mejor protección ante impacto a baja velocidad de una cuchilla de doble filo. Sin embargo, aumentan considerablemente el peso de la protección personal. Una correcta combinación entre telas flexibles y telas rígidas es lo más deseable a la hora de diseñar una protección personal para uso diario de un miembro de las Fuerzas y Seguridad del Estado.

1. Introducción

Las telas de alto rendimiento fabricadas de fibras de aramida o polietileno de alta densidad molecular han demostrado una buena resistencia en aplicaciones donde se requieren altos niveles de energía absorbida y de protección. En los últimos años, se ha producido un aumento de la demanda de prendas de protección utilizadas como protección balística y anti arma blanca [1]. Tradicionalmente, las investigaciones se han centrado en las protecciones balísticas [2-5]. Sin embargo, el análisis de chalecos antibala sometidos a objetos punzantes no ha sido suficientemente estudiado a pesar del gran número de amenazas de este estilo. Por ejemplo, en Reino Unido, la Oficina de Estadística de dicho país mostró que el cuchillo es el arma más utilizada; en el último año, los delitos por cuchillo aumentaron un 10% y los asaltos sexuales con dicha arma se incrementaron un 28% [6]. Los estudios revelan que la mayoría de heridas infringidas por arma blanca (63.3%) son potencialmente mortales.

El diseño de protecciones personales que puedan minimizar el daño producido por un arma blanca es uno de los grandes retos de los fabricantes. Las telas de alto rendimiento pueden proporcionar una excelente resistencia balística y, sin embargo, ser ineficaces para una protección frente a arma blanca [7]. Para mejorar la resistencia ante penetración de arma blanca de la protección personal se puede emplear elementos auxiliares rígidos tales como placas metálicas o cerámicas. Sin embargo, aumenta el peso, el volumen y la rigidez de la protección empeorando considerablemente el confort de la protección. Una alternativa a estos elementos auxiliares rígidos es el uso de capas poliméricas o láminas en las telas.

Pocos estudios [1,8] se han centrado en el análisis del comportamiento mecánico de los tejidos de alto rendimiento para la protección anti-arma blanca debido a que estos tejidos son comerciales y las empresas son muy celosas de compartir información. Por ello, el objetivo de este trabajo es desarrollar un análisis experimental en telas de alto rendimiento mediante ensayos de torre de caída con el fin de estudiar la capacidad de absorción de energía de dos tipos de fibras distintas, un tejido flexible y una lámina de aramida con resina termoplástica.

2. Configuración experimental

2.1. Torre de caída

El equipo utilizado en el experimento es una torre de caída de peso instrumentada de la marca CEAST Fractovist, modelo 6785 (figura 1) junto con un equipo de adquisición de datos DAS 4000 que está dotado con un software para el tratamiento de la información, que permite registrar hasta un máximo de 4000 datos con un tiempo mínimo de muestreo de 1µs.

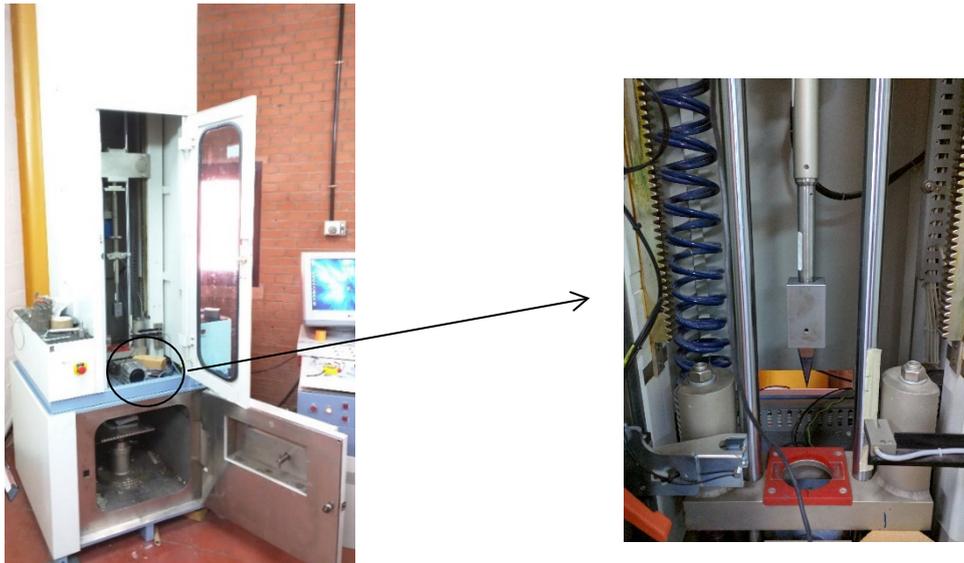


Figura 1:Equipo experimental de la torre de caída y detalle del impactador.

Las probetas de aramida tienen unas dimensiones de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ y están sujetas mediante un dispositivo modular (figura 2). Para evitar el deslizamiento de las probetas, material de lija se adhirió en el contorno.



Figura 2:Sujeción de las probetas de aramida

Siguiendo la norma NIJ Standard-0115.00 [9], se ha utilizado una cuchilla HOSDB/S1/G. La cuchilla tiene una longitud de 100 mm , 20 mm de ancho, 4 mm de espesor y presenta doble filo en la punta, cuya longitud es de 49.2 mm . Para su uso en la torre de caída se ha diseñado un útil similar a los de la norma NIJ. Con el cuchillo correctamente posicionado y fijado en el útil, se puede obtener una penetración máxima de 39 mm aproximadamente.

El útil de fijación de la cuchilla se ha fabricado en acero y se compone de dos piezas que ejercen presión una contra la otra por medio de 4 tornillos y un pasador que sujeta verticalmente los cuchillos para evitar su desprendimiento. Este útil se enrosca en la célula de carga. La masa total del conjunto cuchilla-útiles es de aproximadamente 4.485 Kg .

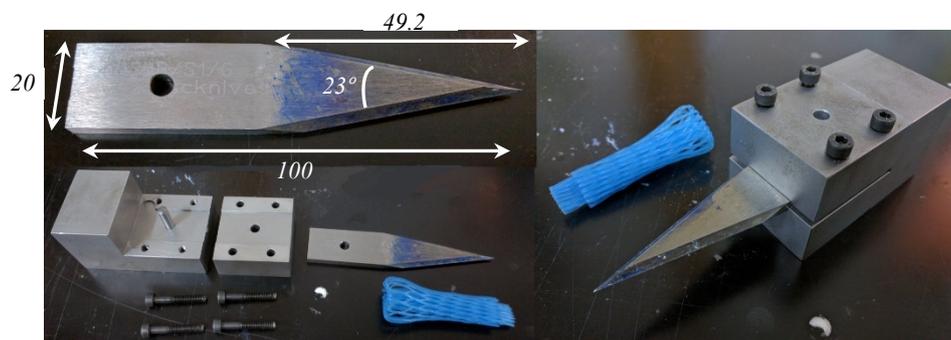


Figura 3:Cuchilla HOSDB/S1/G y útil de sujeción.

2.2. Telas de aramida

Se ha elegido material de aramida para desarrollar este trabajo debido a que presentan excelentes propiedades como una alta resistencia, alto módulo de Young y una buena relación resistencia mecánica/peso. Actualmente, es uno de los materiales más empleados por las empresas de confección de protecciones personales para los miembros de las Fuerzas y Seguridad del Estado. Existen numerosas telas de aramida disponibles en el mercado dependiendo de su confección, resistencia de los hilos, si es flexible o rígida, etc. En este trabajo se han empleado dos aramiditas distintas para estudiar la eficacia de cada una ante impacto y estudiar la disposición de ellas a la hora de sacar conclusiones para la confección de un chaleco policial. Una de las aramiditas empleadas es tela flexible con un peso de 7 g y la otra tiene tratamiento con resina termoplástica que le proporciona una mayor rigidez y peso, 10 g, (se denotará a partir de ahora como lámina). La tela se emplea generalmente para usos balísticos debido a su capacidad para retener al proyectil mientras que la lámina al proporcionar mayor rigidez se emplea para anticuchillo.

Para un correcto análisis de la resistencia a la penetración se ha realizado una composición de 3 aramiditas. Esto es debido a que el análisis mediante una sola lámina o tela era inapropiado porque con la mínima energía ($\approx 0.54 J$) de impacto disponible por la torre de caída se producía la penetración completa. Las configuraciones por las que se han optado para realizar el análisis de la penetración son: tres láminas ($masa = 30 g$), tela/lámina/tela ($19.4 g$) y lámina/tela/lámina ($24.5 g$). Notar que no se ha estudiado la configuración de tres telas debido a que durante el proceso del impacto la cuchilla arrastraba las telas, al ser éstas muy flexibles y se producía el máximo trauma posible.

2.3. Gelatina balística

Para obtener el posible trauma en el individuo y analizar la eficacia de la cuchilla se ha empleado la gelatina balística tipo 3 de la empresa Gelita® con una concentración del 10%. Esta concentración es la que se ha demostrado más cercana al musculo humano [10]. Para su fabricación, previamente, se construyeron unos moldes de silicona partiendo de un cubo de madera de $100 \times 100 \times 100 mm^3$ y unos tubos de PVC como recipiente.

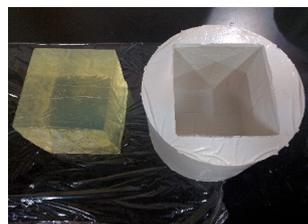
Los bloques de gelatina se fabrican según las instrucciones del propio fabricante; se desmoldan de los moldes de silicona y se envuelven con film transparente para su almacenamiento en el frigorífico a una temperatura de $5^{\circ}C$ hasta el instante inicial del ensayo (figura 4).



Fabricación moldes de silicona



Fabricación de bloques de gelatina en los moldes de silicona



Desmoldeo



Bloques finales de gelatina balística

Figura 4:Proceso de fabricación de la gelatina balística

3. Resultados y análisis

3.1. Análisis del trauma

Se han realizado una media de 18 ensayos de media para cada configuración además de ensayos de repetitividad. Las energías de impacto van desde $0.54 J$ a $6.2 J$. El procedimiento para obtener los traumas en la gelatina se ha

realizado añadiendo tinta azul en la abertura creada por la cuchilla y cortando por una sección próxima al trauma (figura 5).

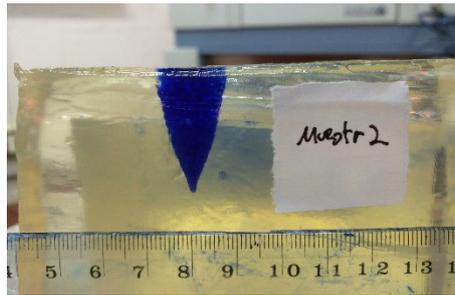


Figura 5: Medida del trauma en la gelatina balística mediante tinta

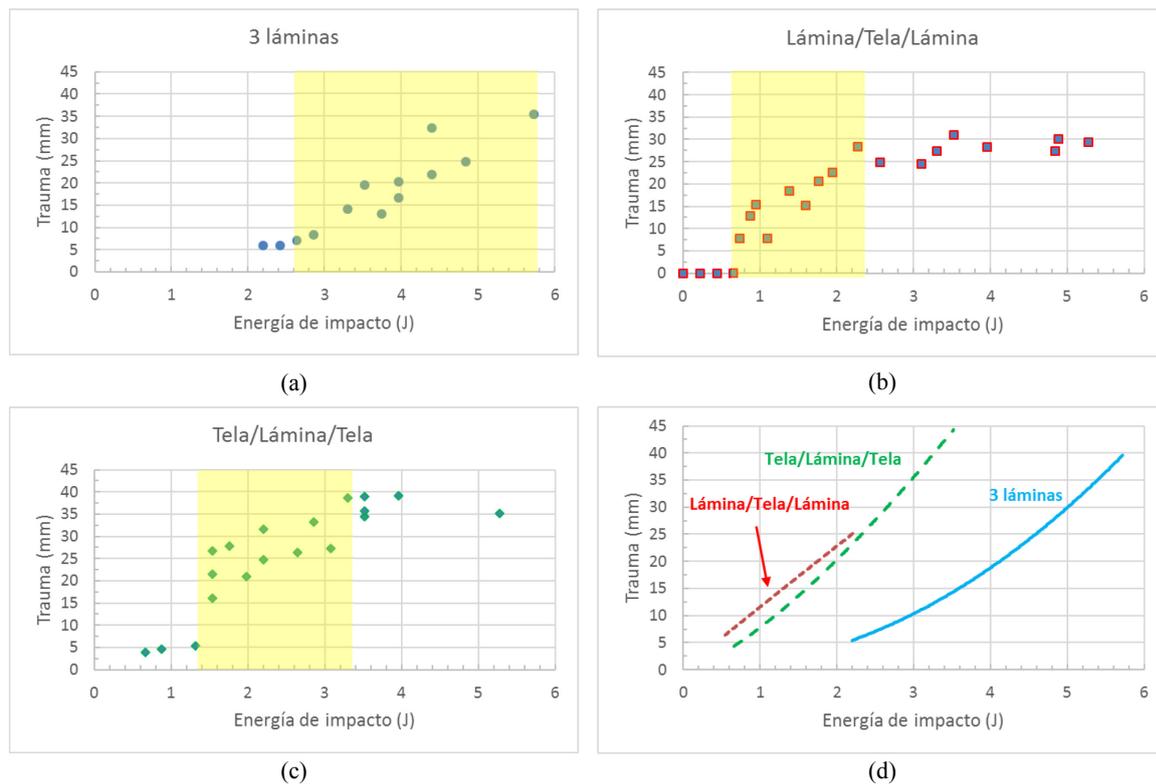


Figura 6: Curvas trauma frente energía de impacto para: (a) 3 láminas, (b) lámina/tela/lámina y (c) tela/lámina/tela; (d) comparación de las tres configuraciones mediante curvas de tendencia.

Las figuras 6(a)-(c) muestran los resultados obtenidos en términos de trauma frente a energía de impacto. El máximo trauma registrado se alcanza para energía de impacto de $5.72 J$, $2.27 J$ y $3.30 J$ para las configuraciones de 3 láminas, lámina/tela/lámina y tela/lámina/tela, respectivamente. Se puede distinguir tres regiones en estas gráficas: la primera es a bajas energías de impacto, donde el trauma es casi constante y próximo a cero; la segunda región es cuando el trauma empieza a incrementarse a medida que se aumenta la energía de impacto. Esta región es claramente dependiente de la rigidez o peso de la configuración. Para una configuración compuesta por 3 láminas, esta región embarca desde $2.6 J$ (de energía de impacto) / $5 mm$ (de trauma) hasta $5.7 J$ / $35 mm$; las configuraciones compuestas entre láminas y telas presentan regiones de crecimiento de trauma más reducidas: de $0.74 J$ / $7.6 mm$ a $2.3 J$ / $28 mm$ para la configuración lámina/tela/lámina y de $1.3 J$ / $5.3 mm$ a $3.3 J$ / $38 mm$ para la configuración tela/lámina/tela. Esto conlleva realizar un análisis de dicha zona graficando las curvas de tendencia que mejor se aproximan -figura 6(d)-. En la figura 6(d) se puede observar las diferencias de comportamiento entre las tres configuraciones. La configuración que más energía de impacto absorbe es la formada por tres láminas, siendo 2.7 veces mayor la energía necesaria para producir un mismo trauma que la configuración lámina/tela/lámina y 2.25 veces mayor que la configuración tela/lámina/tela. La Tabla 1 recoge las ecuaciones que se aproximan a los valores obtenidos en esta región. La tercera zona es común a todas las configuraciones y es la zona de estabilización, es decir, cuando, a medida que aumentamos la energía de

impacto, el valor del trauma producido se mantiene constante al ser el máximo posible. Estos valores difieren según la configuración: $5.72 J$ para el caso de tres láminas, $2.3 J$ en la configuración de lámina/tela/lámina y $3.3 J$ para tela/lámina/tela. Para estos valores de energía se obtiene unos de trauma de $35.44 mm$, $30.96 mm$ y $39 mm$, respectivamente. El trauma obtenido por la configuración tela/lámina/tela es un 10% mayor que la de 3 láminas; sin embargo, la masa es un 35.3% menor. Comparando las dos configuraciones mixtas, el trauma obtenido por la configuración para tela/lámina/tela es un 26% mayor que la configuración lámina/tela/lámina mientras que la masa es 21% menor. El trauma es mayor para esa configuración debido a su modo de fallo, tal y como se verá en el siguiente punto.

La Tabla 1 presenta algunos de los principales resultados obtenidos del ensayo experimental llevado a cabo.

Tabla 1: Resumen de datos en el análisis del trauma

	Masa (g)	Ec. Crecimiento Trauma = A·Energía ^B	Energía absorbida máxima (J)	Trauma máximo (mm)
3 Láminas	30	A=1.05; B=2.08	5.72	35.44
Lámina/Tela/Lámina	24.5	A=11.5; B=0.97	2.3	30.96
Tela/Lámina/Tela	19.4	A=7.8; B=1.38	3.3	39

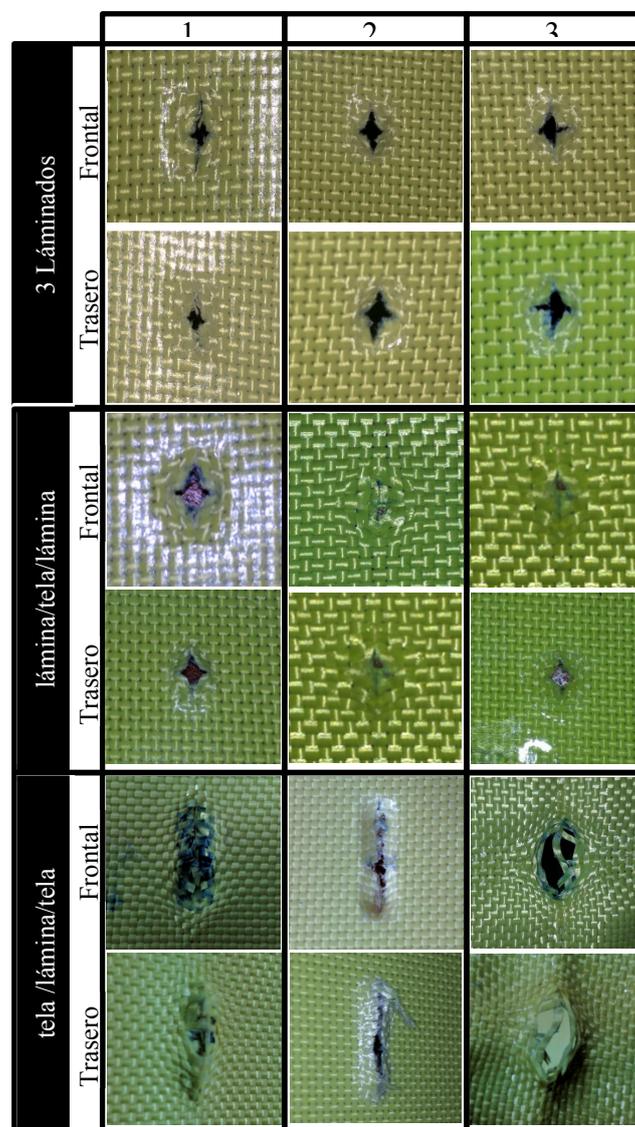


Figura 7: Proceso de fabricación de la gelatina balística

3.2. Análisis del modo de fallo de las telas

En este apartado se analiza el modo de fallo de cada lámina o tela. Para ello, se ha elegido el caso en que el dispositivo de la cuchilla es lanzado desde una altura de *50 mm*. La figura 7 muestra las diferentes telas de cada configuración tras el ensayo experimental. La primera gran diferencia entre las telas y las láminas radica en que en estas últimas el corte es más limpio; sin embargo, en las telas no se produce un corte del tejido, sino que se lleva a cabo un proceso de desplazamiento o abertura entre los hilos del tejido para que pueda pasar la cuchilla. Este proceso provoca que el ancho de la zona dañada sea mucho mayor que en las láminas. Es por ello que los fabricantes de protecciones personales empleen tejidos flexibles lo más compactos posibles si desean fabricar protecciones ante impacto de arma blanca. En el caso de emplear únicamente láminas, el corte producido es de tipo estrella de cuatro puntas, siendo más larga la dirección transversal a los filos de la cuchilla y prácticamente constante para las tres láminas que conforman la configuración. Un comportamiento similar en las láminas se desprende de la configuración lámina/tela/lámina. En este caso, la cuchilla no ha superado la tela flexible desplazando sus hilos, sino que se ha producido un proceso de corte en los hilos. La arbitrariedad del modo de fallo es resaltable y afecta considerablemente a los valores de trauma obtenidos; es por ello, que la repetitividad de este tipo de ensayos es más que justificable. La tercera configuración de estudio es la que presentaba mayor trauma, se puede observar en la figura 7 como el proceso de abertura y de arrastre de las telas es mayor que en los otros casos. Esto es debido a la menor rigidez de la configuración empleada. El cuchillo puede perforar con mayor facilidad y la gran resistencia se la presenta la lámina en la que su modo de fallo cambia completamente respecto a los casos anteriormente analizados. Posiblemente la razón sea que la cuchilla, al arrastrar consigo la tela, vea limitado su movimiento y no tenga más remedio que producir un fallo gobernado principalmente por la cortadura.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado la gran influencia de la elección de telas de aramida para la confección de protecciones personales destinadas a un uso diario y en especial contra una amenaza de arma blanca. El uso de láminas formadas por tela de aramida con base de resina termoplástica proporciona la mejor protección; sin embargo, dificulta su uso debido al mayor peso y peor ergonomía que conlleva. Las soluciones empleando únicamente telas de aramida flexible no presentan una gran protección aunque sí una considerable disminución del peso y una mejor rigidez del conjunto. Por tanto, una solución óptima es emplear configuraciones mixtas entre telas flexibles y telas con resina termoplástica. Dentro de esta solución, la mejor disposición es aquella que sea lo más rígida posible. La limitación, por tanto, a la hora de realizar una protección personal será la del peso y ergonomía que nos especifique el usuario final. Esto dependerá del grado de amenaza a la que el usuario se enfrente.

Para medir el trauma se empleó gelatina balística para simular el tejido blando humano. El empleo de la gelatina balística en detrimento de la plastilina balística es una de las aportaciones que tiene el trabajo presentado.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad y al Programa FEDER 2014-2020 a través del Proyecto RTC-2015-3887-8 en el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad.

Los autores agradecen a la empresa FECSA su colaboración y en especial al Dr. Álvaro Olmedo sus comentarios y la discusión sobre la eficiencia de los materiales empleados frente a arma blanca.

Referencias

- [1] K.K Govarthanam. Development of an Advanced Personal Protection Equipment Garment for Protection Against Slashes, University of Bolton, Bolton Reino Unido, (2012).
- [2] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crépin, A. Imad. Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact, *Engineering Failure Analysis*, 18 (2011), 2179–2187.
- [3] G. Nilakantan, E.D. Wetzel, T.A. Bogetti, J.W. Gillespie. A deterministic finite element analysis of the effects of projectile characteristics on the impact response of fully clamped flexible woven fabrics, *Composite Structures*, 95, (2013), 191–201.
- [4] E. M. Parsons, T. Weerasooriya, S. Sarva, S. Socrate. Impact of woven fabric: Experiments and mesostructure-based continuum-level simulations, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 58, (2010), 1995–2021.

-
- [5] A. Tabiei, G. Nilakantan. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review, *Applied Mechanics Reviews*, 61(2008), 010801.
- [6] J. Allan. Crime Outcomes in England and Wales 2014/15, Office for National Statistics, London, (2015).
- [7] X. Chen. Stab characterization of STF and thermoplastic impregnated ballistic fabric composites en: In *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*, Woodhead Publishing, 2016. ISBN:978-1-78242-461-1.
- [8] R.F. Mahbub, L. Wang, L. Arnold. The Necessity of Stab-Resistant Body Armour for Protecting Prison Officers in Saudi Arabia, *Advanced Materials Research*, 1048,(2014), 272-277.
- [9] NIJ, Stab Resistance of Personal Body Armor NIJ Standard-0115.00, National Institute of Justice Office of Science and Technology, US Department of Justice, Estados Unidos, (2000).
- [10] Cronin DS, Falzon C. Characterization of 10% ballistic gelatin to evaluate temperature, aging and strain rate effects, *Experimental Mechanics*, 51(7), (2011):1197–1206.