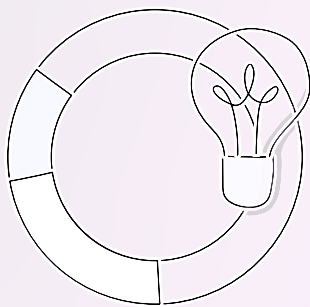
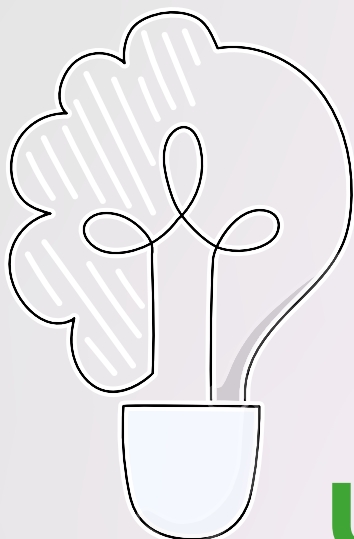






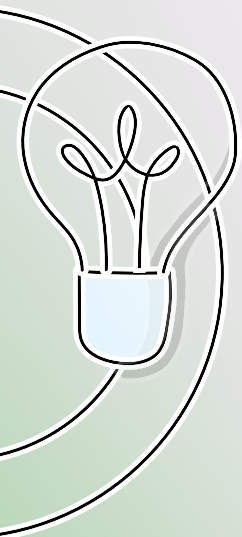
ENSA

Uso de STF en textiles

para elementos de
protección antipunzón

*Use of STF in textiles for
puncture protection elements*

Angélica Margoth Quiroga Barreto*



Resumen

ABSTRACT

En la industria manufacturera y de seguridad, existe el riesgo de lesiones por objetos cortantes o punzantes en sectores como la confección, metalmecánica, salud, veterinaria y construcción, debido a que el personal manipula herramientas con filo o punta. Los agentes de la policía y la milicia, al igual que de la correccional, también se ven expuesto a lesiones con arma blanca u objetos cortopunzantes. En ambos casos, se pueden ocasionar heridas fatales, generar incapacidad permanente o temporal y traumas que les impidan desempeñar sus funciones. Por este motivo, es indispensable el uso de elementos de protección personal resistentes a punción para mitigar el riesgo de accidentes ocupacionales.

Mediante el uso de nanotecnología, se ha logrado funcionalizar textiles para elementos de protección personal, confiriéndoles características excepcionales sin afectar su apariencia ni sus propiedades mecánicas. En este estudio, se dan a conocer los avances en el uso de fluidos de engrosamiento por esfuerzo cortante con nanopartículas de sílice, para aplicaciones antipunzón en textiles técnicos. Se tiene en cuenta la influencia de diferentes variables de proceso para la obtención del STF (Shear Thickening Fluid) y el método de impregnado en el textil, a partir de la recopilación de diferentes hallazgos en investigaciones realizadas alrededor del mundo mediante el análisis bibliométrico.

Palabras clave:

Antipunzón, aramida, dióxido de sílice, elemento de protección personal, Kevlar®, nanopartícula, nanotecnología, STF.

In the manufacturing and security industry, there is a risk of injuries caused by sharp or pointed objects in sectors such as clothing, metalworking, health, beauty and construction, due to the fact that personnel handle sharp or pointed tools. Police and military officers, as well as correctional officers, are also exposed to stab and sharps injuries; In both cases, this can cause fatal injuries, permanent or temporary disability and trauma that prevent them from performing their duties. For this reason, the use of puncture-resistant personal protection elements is essential to mitigate the risk of occupational accidents.

Through the use of nanotechnology, it has been possible to functionalize textiles for personal protection elements, giving them exceptional characteristics without affecting their appearance or their mechanical properties. In this study, advances in the use of shear thickening fluids with silica nanoparticles for anti-puncture applications in technical textiles are reported. The influence of different process variables is taken into account to obtain the STF (Shear Thickening Fluid) and the impregnation method in the textile, based on the compilation of different findings in investigations carried out around the world through bibliometric analysis.

Keywords:

Puncture resistance, aramid, silica, personal protection element, Kevlar®, nanoparticle, nanotechnology, shear thickening fluid.

Introducción

El uso de elementos de protección personal (EPP), es indispensable para mitigar el riesgo de accidentes ocupacionales en la industria manufacturera y de seguridad, causados por la manipulación de instrumentos y equipos, el traslado dentro espacios con movilidad reducida o la presencia de objetos peligrosos en el área de trabajo. Uno de estos riesgos, implica la posibilidad de desarrollar enfermedades infecciosas por lesiones graves con objetos cortopunzantes (Ind & Jeffries, 1999).

En los sectores industriales de la confección (Ind & Jeffries, 1999), metalmecánica (Elles et al., 2018) y construcción (Birhane et al., 2020), los accidentes con objetos puntiagudos (puntillas, agujas, cuchillas, tijeras, entre otros), pueden ocasionar enfermedades bacterianas como el tétanos, que ingresa al cuerpo a través de un corte profundo o el estreptococo que puede provocar una infección necrosante, con pérdida de miembros del cuerpo o fatalidad.

Por su parte, los prestadores de servicios de aseo (Oza et al., 2022), salud y belleza (Auta et al., 2018), se encuentran expuestos a lesiones percutáneas que pueden derivar en el contagio de enfermedades virales como VIH, Hepatitis B y Hepatitis C, ocasionadas por la manipulación de agujas contaminadas biológicamente. Los prestadores de servicios veterinarios (Epp & Waldner, 2012) se enfrentan al contagio de enfermedades zoonóticas por el mismo mecanismo de punción y por mordidas de animales.

Adicional a los riesgos en la industria, en temas de seguridad ciudadana en el país, el hurto a personas representa el 38% de las modalidades delictivas que más preocupan a los habitantes del Distrito Capital, y de acuerdo con la encuesta realizada por la Cámara de Comercio de Bogotá, en el 40% de los asaltos, el agresor usó un arma blanca (Cámara de Comercio de Bogotá, 2021). La inseguridad en el país a consecuencia de la delincuencia común, también implica que el personal de la fuerza pública, vigilancia y guardia penitenciaria y carcelaria, se encuentre más expuesto a este tipo de agresión, lo que traduce en incapacidades, discapacidades y asesinatos dentro de las instituciones de defensa (Coca Muñoz & Thomas Argueta, 2017).

Por lo anterior, los elementos de protección personal desempeñan un papel importante en

garantizar la integridad de quien los usa, y los avances tecnológicos son indispensables para motivar su uso adecuado.

Actualmente, existe una amplia variedad de elementos de protección personal contra objetos cortopunzantes; los cuales están elaborados con materiales resistentes como fibra de polietileno, poliuretano, Nylon® o aramida (Yang et al., 2016), nitrilo reforzado, látex o hule (Villano et al., 2017), fibra de vidrio (Shi et al., 2021), cuero o lona (Memon et al., 2020) y grafeno (Bhattacharjee et al., 2019).

Sin embargo, los tejidos elaborados con materiales técnicos como el Kevlar® o el Nomex® a partir de fibra de aramida, se enfrentan al desafío de resistir el impacto de una puñalada en un área de contacto pequeña, ya que la punta genera que los hilos se separen y entre con relativa facilidad, adicional al corte que causa el filo, conllevando a una falla en la onda de disipación de la energía en el impacto a baja velocidad (Wang, 2016).

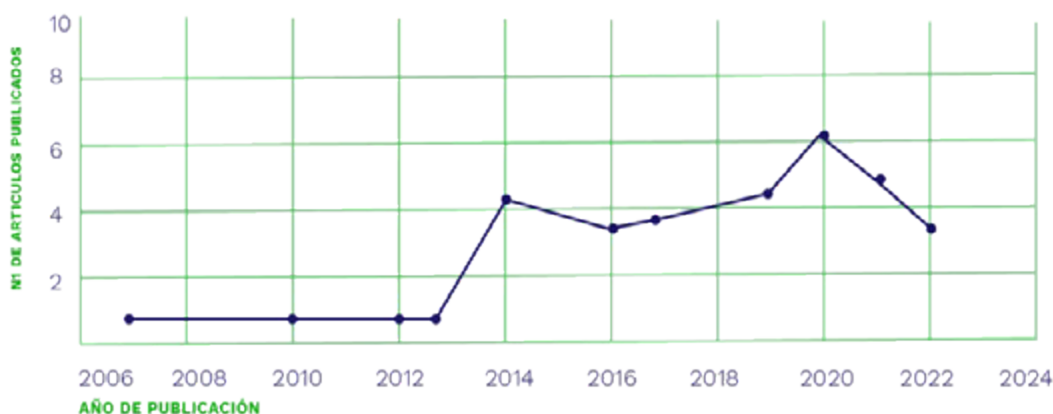
Para mejorar las propiedades mecánicas de los tejidos y hacerlos más resistentes a la punción, es necesario usar textiles de alta densidad (más de 12 hilos de trama/cm), en comparación de los usados en balística que son de baja densidad por someterse a un impacto en un área de contacto más grande (7-9 hilos de trama/cm) (Wang, 2016).

Adicional, para conferir esta propiedad al elemento, es necesario reforzar la fibra de Kevlar® con Nylon®, fibra de vidrio, resinas o hule, ocasionando que aumente su volumen y disminuya su flexibilidad (Dong et al., 2010).

El peso y el rendimiento, en cuanto a nivel de protección, son las variables críticas para utilizar un material en elementos de protección anticorte y antipunzón (Dong et al., 2010). Por lo tanto, es fundamental usar nuevas tecnologías para evitar el uso de recubrimientos o multicapas en textiles destinados a esta aplicación.

Mediante el uso de Nanotecnología, se ha logrado funcionalizar tejidos para la fabricación de EPP, mejorando la rigidez al corte y la perforación, disminuyendo el peso y el calibre (Abed & Jawad, 2022). A diferencia de otros aditivos, los recubrimientos con nanomateriales no forman una capa superficial sobre la tela, sino que interactúan íntimamente con el textil tratado, confiriéndole propiedades de resistencia y mayor durabilidad (Campos, 2014). Esto permite incorporar nanopartículas en el tejido sin afectar significativamente sus propiedades físicas como suavidad, acabado, flexibilidad y caída (Quintili, 2012).

Figura 1.
Producción científica de artículos relacionados con el tema central



Nota. Autoría propia - biblioshiny

Para esta aplicación específica (anticorte y antipunzón), las nanopartículas se adhieren al tejido mediante el uso de un STF (Shear Thickening Fluid) o fluido de engrosamiento por esfuerzo cortante, que se caracteriza por ser una dispersión coloidal que exhiben un aumento abrupto de la viscosidad cuando la tasa de corte o la tensión aplicada se encuentran por encima de un valor crítico (Ding et al., s.f).

En este estudio, se da al conocer los avances en el uso de fluidos de engrosamiento por esfuerzo cortante, para aplicaciones antipunzón en textiles técnicos. Se tiene en cuenta la influencia de diferentes variables de proceso para la obtención del STF y el método de impregnado en el textil, a partir de la recopilación de diferentes hallazgos en investigaciones realizadas alrededor del mundo utilizando técnicas bibliométricas.

Metodología

Se revisaron investigaciones publicadas entre los años 1999 a 2022, sobre elementos de

protección personal antipunzón a partir de textiles técnicos funcionalizados con STF, con el objetivo de recopilar la información y reconocer los aspectos relevantes para la obtención de estos. En una primera etapa, como fuente de información inicial, se utilizó Web of Science, y se obtuvieron 121 resultados ordenados por relevancia a partir de la ecuación ("puncture resistance" OR stab resistance) AND (textile OR fabric) AND (STF OR "shear thickening fluid") ("body armour").

A partir de esta búsqueda, se realizó el análisis bibliométrico mediante el uso de la herramienta Biblioshiny de Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017); se encontró que se han realizado publicaciones relacionadas en 24 revistas científicas con un promedio de 4,09 artículos por año entre 2007 y 2022.

En la Figura 1, se puede observar que en los últimos 3 años hay un creciente interés en la investigación de los STF en textiles con aplicaciones antipunzón, con una tasa anual de crecimiento del 17,46% y en la Figura 2 se encuentra la red de coocurrencia y las palabras clave más relevantes dentro de las publicaciones revisadas.

Figura 2.
Red de coocurrencia y palabras clave



Nota. Autoría propia - biblioshiny



En la Figura 3, se encuentra que los países en que más se realiza producción científica relacionada son: China en primer lugar con 71 artículos, seguido de Irán con 24, Turquía con 15 e India con 14, y en menor medida Corea del Sur, Estados Unidos, Brasil, Lituania, Polonia y el Reino Unido. Teniendo en cuenta la relevancia de los artículos analizados mediante el uso de Bibloshiny, se usa la herramienta Tree of Science para definir los artículos seminales de los originales de interés (20 publicaciones), los artículos donde se hicieron las primeras aplicaciones del tema (20 publicaciones) y los que sintetizan la información relacionada con los hallazgos más recientes (14 publicaciones).

Finalmente, a partir de la lectura rápida del resumen de cada artículo, se seleccionaron los que eran más acordes al tema central, encontrando 33 resultados que cumplieran con los criterios.

En una segunda etapa, se identificó la necesidad de ampliar la información sobre la evolución de los EPP a través de la historia y el uso de nanopartículas de sílice como componente principal en la obtención de STF. Se realizaron dos búsquedas por separado para ahondar en estos aspectos a partir de las ecuaciones (injuries*) AND (industry*) AND (punction*) AND (“personal protection elements”) para elementos de protección personal y (“silica*” OR

“silice*”) AND (nanoparticle* OR particle*) AND (síntesis* OR production*) (“silica nanoparticles” OR “nanopartículas de sílice”) para la síntesis de nanopartículas de sílice.

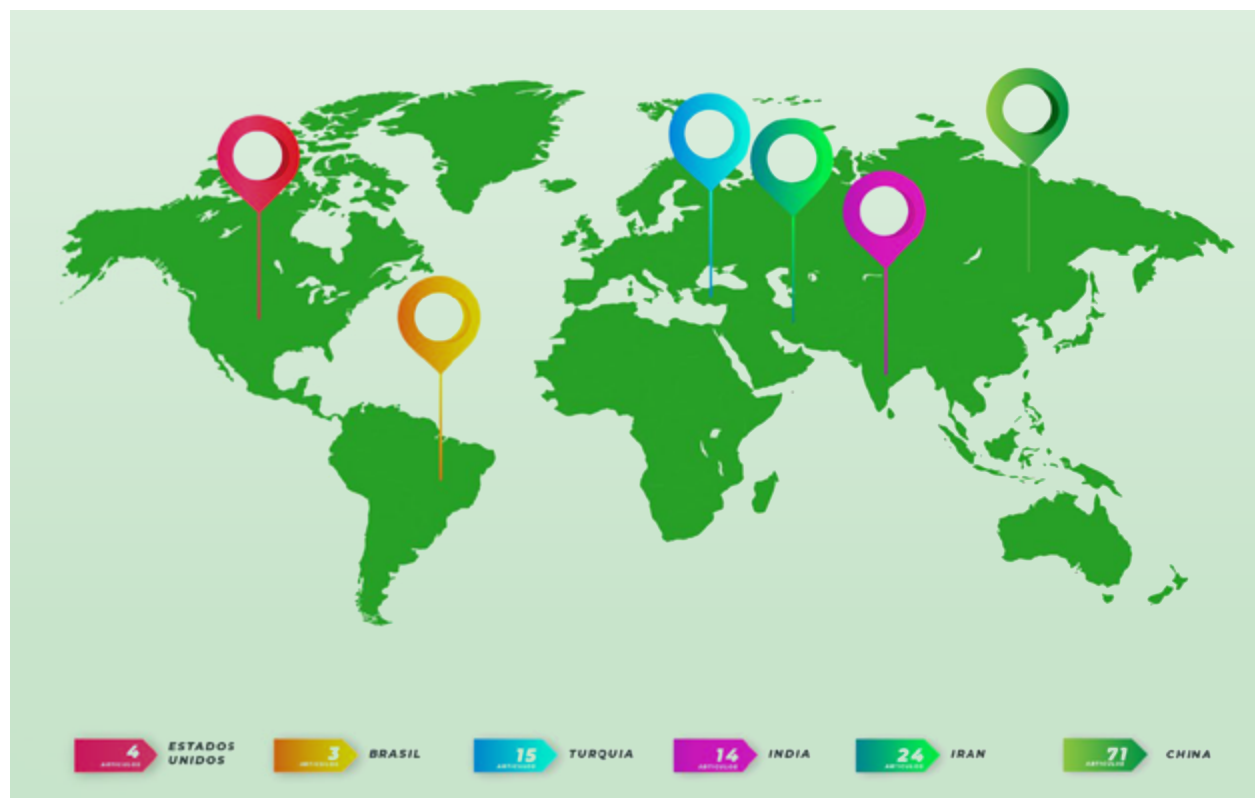
De ésta última etapa, se revisaron únicamente los artículos seminales y a partir del contenido, se eligieron 9 publicaciones para ahondar el tema sobre la obtención de nanopartículas de sílice y otras 9 publicaciones para conocer la evolución de los materiales usados en protección personal antipunzón.

Finalmente, se complementaron las estadísticas con otro tipo de recursos diferentes a artículos científicos, procedentes de entidades y empresas expertas en el tema.

Textiles para aplicaciones antipunzón

Para la fabricación de armaduras y otros elementos de protección personal, se han utilizado textiles que sean resistentes y en lo posible, que no reduzcan la movilidad. Los asirios afirmaron ser los primeros en usar “armaduras textiles” que se prepararon a partir de múltiples capas de lino acolchadas como una sola armadura. La armadura hecha de lino acolchado se usaba para un bajo nivel de protección contra

Figura 3.
Producción científica por país



Nota. Autoría propia – Tree of Science

los arqueros, y la armadura de láminas metálicas se usaba para una mayor protección contra las lanzas. Esto indica que los diseñadores eran conscientes de los problemas ergonómicos en ese momento (Nayak et al., 2017).

Las armaduras textiles permitieron que surgiera un nuevo tipo de protección “blanda”, ya que éstas eran fabricadas con elementos rígidos como madera, piedra y metal (Nayak et al., 2017). Los materiales usados para esta aplicación, a través de la historia se han adaptado a las necesidades y el entorno, conforme avanza la tecnología.

Para la primera guerra mundial, se desarrollaron uniformes de seda que podían resistir proyectiles a baja velocidad (hasta 120m/s); Sin embargo, no eran suficientes para velocidades superiores a 180m/s (Mawhlieng et al., 2020). En la segunda guerra mundial, surgieron los uniformes en Nylon® que proveían una barrera contra los fragmentos de metralla, pero aún no soportaban el impacto de un rifle; además, eran voluminosos y muy pesados, afectando el rendimiento del personal a la hora de la batalla (Mawhlieng et al., 2020).

Finalmente, en 1965, la empresa Dupont desarrolló una fibra sintética de p-aramida con alta resistencia y baja densidad que mostraba un buen desempeño balístico y antipunzón, además de ser menos pesada e incómoda (Mawhlieng et al., 2020). La variedad más usada de este material es el Kevlar®; su estructura química comprende varios enlaces entre cadenas recurrentes entrelazadas con hidrógeno, proporcionando una fuerza tensil 10 veces mayor que el acero con un similar (DuPont, 2022).

La fibra de Kevlar® 29 se utiliza en aplicaciones balísticas, cuerdas y cables, vestuario de protección (guantes resistentes a los cortes), elementos de protección de vida (cascos, blindajes y chapados) y como refuerzo de caucho en neumáticos y mangueras de automóviles (DuPont, 2022).

Su alta resistencia a la tracción y módulo, y el menor alargamiento de la fibra, hacen que las aramidas ofrezcan grandes ventajas sobre otras fibras sintéticas. Por sus características, permiten que se formen telares más fácilmente que con filamentos quebradizos como la fibra de vidrio, de carbono o de cerámica, no tienen punto de fusión (se degradan a temperaturas mayores a 500°C) y tienen baja inflamabilidad (Wang, 2016).

Pese al buen desempeño de las aramidas en protección balística y anticorte, el uso de nanotecnología para la funcionalización de textiles técnicos ha permitido mejorar el rendimiento y el confort de los EPP a la vez que aumenta la

resistencia en estas aplicaciones, sin afectar apreciablemente las propiedades mecánicas (Soliman & Hassabo, 2021).

A continuación, se describe el uso de nanotecnología en textiles para el mejoramiento de propiedades físicas, químicas y microbiológicas a partir de nanopartículas en suspensión.

Nanotecnología en el mejoramiento de textiles

Los textiles mejorados con nanotecnología se denominan *Textiles Nanotecnológicos*. Algunas aplicaciones incluyen el aislamiento térmico en prendas de vestir para deportistas, textiles con protección ultravioleta (UV), antibacteriales, autolimpiantes y antirreflejo y elementos de protección personal ignífugos, anticorrosivos, repelentes al agua y resistentes al corte (Quintili, 2012).

Los nanomateriales se caracterizan por presentar un tamaño de partícula entre y 1nm y 100nm en al menos una dimensión; debido a su tamaño exhiben propiedades fisicoquímicas únicas y características ajustables, alta resistencia mecánica, bioactividad y reabsorbilidad mejoradas (Hincapié et al., 2020).

A diferencia de otros aditivos, los recubrimientos a base de nanotecnología no forman una capa superficial sobre el textil, sino que interactúan íntimamente con el material tratado, confiriéndole propiedades de resistencia y mayor durabilidad (Campos, 2014).

Esto permite incorporar nanopartículas en el tejido sin afectar significativamente sus propiedades físicas como suavidad, acabado, flexibilidad y caída (Wang, 2016).

Los materiales fabricados con Nanotecnología tienen menos defectos y mejor calidad, ya que su estructura presenta propiedades uniformes y suponen un mayor control durante su elaboración; sin embargo, es una tecnología que todavía se encuentra en etapa de crecimiento, donde un gran número de aplicaciones aún son estudiadas a nivel de laboratorio y no han llegado a la escala industrial (Ruta Medellín, Centro de Innovación y Negocios, 2015).

Uno de los compuestos ampliamente usados para la funcionalización de textiles es el dióxido de silicio o sílice (SiO₂); se utiliza para la fabricación de recubrimientos a escala nanométrica, ya que es uno de los más abundantes del planeta, no es tóxico y es amigable con el medio ambiente

(Fernandes et al., 2019). Este compuesto se encuentra presente principalmente en arena y cuarzo, pero también hay otras fuentes naturales como la cascarilla de arroz y las verduras de hojas verdes, que lo poseen en menor cantidad (Arcos et al., 2007). En la siguiente sección, se describe la obtención de nanopartículas de SiO₂ mediante el proceso Sol-Gel y su uso en el mejoramiento de materiales.

Síntesis de nanopartículas de SiO₂ para recubrimientos textiles

Las nanopartículas de sílice son ampliamente usadas en diversas aplicaciones debido a su facilidad de síntesis, alta biocompatibilidad de área específica y fase vítrea residual, valores de dureza mejorados, propiedades mecánicas robustas, composición química relativamente inerte, alta estabilidad frente a la degradación enzimática, alta capacidad de carga, biodegradabilidad mejorada, gran área de superficie, grandes volúmenes de poros adaptables (1.3-50 nm) y la capacidad de funcionalizarse con diferentes materiales y/o moléculas a través de la ingeniería de superficies (Hincapie et al., 2020).

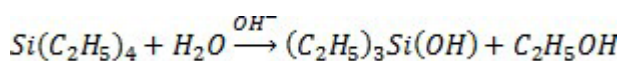
Además, las nanopartículas se utilizan como soportes catalíticos, para modificar las propiedades superficiales de las películas sintéticas, aumentar la dureza, la durabilidad y la integridad de los recubrimientos (Vasconcelos et al., 2002), en sustratos electrónicos, películas delgadas, aislantes eléctricos/térmicos, emulsionantes y estabilizadores (Rahman et al., 2007), entre otros. La calidad de estos productos depende en gran medida del tamaño y la distribución de las partículas de sílice.

Para la obtención de partículas de sílice, (Stober & Fink, 1968) desarrollaron un sistema de reacciones químicas basado en el proceso Sol-Gel, que permite el crecimiento controlado de partículas esféricas de sílice de tamaño uniforme, mediante la hidrólisis de silicatos de alquilo y la posterior condensación del ácido silícico en soluciones alcohólicas. Los silicatos de alquilo son usados como precursores debido a que su rapidez de reacción química permite realizar variaciones en los parámetros de reacción durante el proceso de síntesis, lo que conduce a la obtención del material con las propiedades deseadas (Ludeña, 2021). Los dos silicatos de alquilo más empleados para realizar la obtención de sílice son el tetraetil ortosilicato (TEOS) [Si(C₂H₅)₄], y el tetrametil ortosilicato (TMOS) [Si(OCH₃)₄]. Se ha observado que la longitud de la cadena orgánica afecta a la rapidez de hidrólisis debido a factores estéricos,

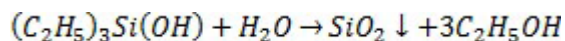
es decir que, si la longitud de la cadena orgánica aumenta, la rapidez de hidrólisis disminuye, lo que permite un cierto control del proceso desde la naturaleza del silicato de alquilo precursor (Ludeña, 2021).

El proceso sol-gel consiste en la progresiva conversión de moléculas precursoras a un coloide (Sol) y luego a una red integrada (Gel); un Sol es un coloide, es decir, partículas muy finas dispersas en un medio continuo en el que las partículas son sólidas y el medio de dispersión es un fluido. Estas partículas deben poseer dimensiones menores a 1µm para que el sistema este gobernado por el movimiento Browniano y éstas permanezcan dispersas en el fluido. Por lo contrario, si las dimensiones son mayores a 1µm, la fuerza gravitatoria empieza a gobernar el sistema obligando a las partículas a sedimentar. Un gel es un coloide donde el medio líquido se ha vuelto lo suficientemente viscoso y se comporta de forma similar a un “sólido”. La ventaja de usar el proceso Sol-Gel es que permite el control de la síntesis desde los precursores hasta el producto final (Ludeña, 2021).

El método Stober describe la síntesis a partir de la hidrólisis del Tetraetil OrtoSilicato (TEOS) y la condensación en Etanol [C₂H₅OH], usando como catalizador, hidróxido de Amonio [NH₄OH]. La reacción de hidrólisis produce el monómero monohidrolizado de TEOS, trietilsilanol [(C₂H₅)₃Si(OH)], como se muestra a continuación (Green et al., 2003):



Este producto de reacción intermedio se condensa para finalmente formar sílice, como se muestra en la siguiente condensación simplificada:



La reacción de condensación puede observarse fácilmente porque, después de una reacción hidrolítica, la condensación se indica mediante una creciente opalescencia de la mezcla que comienza 1-5 minutos después de añadir el TEOS; posterior a esa fase inicial, una suspensión blanca turbia ocurre pocos minutos después. (Stober & Fink, 1968)

Aunque es un método sencillo, directo y de bajo costo (Gaoyuan et al., 2020), es altamente dependiente de las concentraciones de todos los reactivos involucrados, la temperatura y la velocidad de agitación; estas variables afectan las tasas de hidrólisis y condensación y, en consecuencia, el tamaño final de las partículas, así

como su distribución y área superficial. Una tasa de hidrólisis más alta y una tasa de condensación más baja producen partículas más pequeñas y viceversa (Fernandes et al., 2019). Para reducir la producción de partículas de diferente tamaño, es importante mantener constantes las condiciones de temperatura y agitación (Stober & Fink, 1968).

Dependiendo de los parámetros del proceso de síntesis, la estructura de las partículas coloidales puede variar desde partículas esféricas aisladas hasta aglomerados de estructuras complejas (Vasconcelos et al., 2002).

El procedimiento generalizado consiste en la adición de agua y TEOS al etanol con calentamiento y agitación constantes hasta homogenización y luego se agrega el catalizador en medio ácido o básico para propiciar la formación del gel. Posteriormente se somete el producto final a secado (Flores, 2009).

Como (Fernandes et al., 2019) concluyó en su investigación, la velocidad de agitación no afecta el tamaño de las partículas y el diámetro disminuye a medida que aumenta la temperatura del sistema de reacción. Sin embargo, influye en la morfología, ya que una baja velocidad de agitación permite obtener partículas más uniformes. Por su parte, (Vasconcelos et al., 2002) menciona que el diámetro de las partículas de sílice aumenta al elevar las cantidades de NH_4OH y H_2O , y al disminuir la cantidad de $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Por otro lado, (Ludeña, 2021) estudia el efecto del pH, encontrando que si el proceso sol-gel se realiza en valores bajos de pH (catálisis ácida) la reacción de hidrólisis es más rápida que la reacción de condensación, lo que favorece la formación de una red polimérica poco ramificada; a valores altos de pH (catálisis básica) la reacción de condensación es más rápida que la reacción de hidrólisis favoreciéndose la formación de estructuras altamente ramificadas con anillos internos.

Por su parte, (Rahman et al., 2007) encontraron que el aumento en la concentración de TEOS dió como resultado un polvo más grande y distribuido, mientras que en alta temperatura y en la agitación magnética se produjo un polvo altamente agregado. Una relación $\text{H}_2\text{O}/\text{TEOS}$ más alta y una concentración de amoníaco más baja a una velocidad de alimentación más lenta, produjeron partículas en el rango de 10-14nm. De hecho, afirman, que la concentración de TEOS, amoníaco, agua, disolvente (alcohol) y la temperatura de reacción son los 5 parámetros clave que rigen el tamaño y distribución de las estas partículas.

Finalmente, (Guo et al., 2016) contempla otro factor en la reacción donde adiciona PEG1000 como tensioactivo; obtiene partículas entre 18-35nm pero completamente amorfas, por lo que su aplicación no resultaría conveniente en todos los campos.

Teniendo en cuenta cómo influye el tamaño, forma y distribución de las partículas en su aplicación, a continuación, se describe el uso de SiO_2 a escala nanométrica para la obtención de STF que permita mejorar la resistencia antipunción de textiles técnicos.

Fluidos de engrosamiento por cizallamiento – STF (Shear Thickening Fluids)

Los fluidos espesantes por cizallamiento o Shear Thickening Fluids (STFs) son dispersiones coloidales que exhiben un aumento abrupto de la viscosidad cuando la tasa de corte o la tensión aplicada se encuentran por encima de un valor crítico (Ding et al., s.f).

En general, los STF se componen de dos fases: una fase sólida de Nano o Micropartículas y una fase líquida que actúa como vehículo. Las partículas dispersas deben ser más pequeñas que el diámetro de la fibra que será impregnada y el medio de dispersión debe ser estable a condiciones ambiente para que se favorezca la dispersión uniforme de las partículas y se mantengan adheridas al tejido (Zarei & Aalaie, 2020).

La fase líquida puede estar compuesta por etanol, Polietilenglicol (PEG), Etilenglicol (EG), Polipropilenglicol (PPG), aceites siliconados o una mezcla de estos con tensioactivos y/o polímeros. Para la fase sólida, los compuestos comúnmente usados son dióxido de sílice (SiO_2), carbonato de calcio (CaCO_3), polietileno (PE) y polimetilmetacrilato (PMMA) (Lin et al., 2019).

Un ejemplo de estos compuestos es el desarrollado por (Gong et al., 2014), donde obtuvieron STF variando las partículas dispersas de SiO_2 , PMMA y Poliestireno-etilacrilato (Ps EA) en soluciones de etanol, PEG200 y PEG600 para evaluar sus propiedades reológicas del fluido y su comportamiento en el textil impregnado ante pruebas de resistencia anticorte y antipunción.

El Polietilenglicol es uno de los vehículos más usados para STF, ya que es altamente estable, tiene un punto alto de ebullición y no es inflamable. Un STF típico está compuesto por nanopartículas de sílice (SiO_2) suspendidas en PEG (Wang, 2016).

Los principales mecanismos para explicar cómo se obtiene esta transición abrupta de líquido a sólido en los STF son (Zarei & Aalaie, 2020):

- Transición orden-desorden: implica un aumento de arrastre entre las partículas que ocasiona pasar de una estructura ordenada a una estructura desordenada cuando la tasa de corte es alta.
- Agrupación hidráulica (hydroclusters): Describe la tendencia de las partículas hacia la formación de cúmulos bajo fuerzas de corte, conduciendo a un aumento de las fuerzas de arrastre entre las mismas.
- Fuerzas de contacto: La fuerza de corte causa una fuerza hidrodinámica que tiende a sacar a las partículas de la capa ordenada en la que se encuentran, propiciando la interacción con otras moléculas. Con un esfuerzo cortante bajo, no hay contacto significativo entre partículas, por lo que el comportamiento del STF será newtoniano y no habrá un aumento en la viscosidad que permita una resistencia al impacto. Entre mayor sea la tensión, más viscoso será el fluido y podrá alcanzar un estado completamente sólido; sin embargo, es un comportamiento reversible, ya que una vez disminuya la tensión, volverá a su estado líquido normal.

A bajas tasas de cizallamiento, el STF tiene baja viscosidad y se comporta como un fluido; a altas tasas de cizallamiento, las fuerzas hidrodinámicas superan a las fuerzas repulsivas y se forman hidrocúmulos, lo que ocasiona que el líquido sea incapaz de llenar los espacios entre partículas y la fricción provoque un enorme aumento de viscosidad. Cuando un STF es sometido a cizallamiento, se le puede considerar un fluido no newtoniano (Ding et al., s.f).

La naturaleza real del espesamiento por esfuerzo cortante depende de los parámetros físicos de la fase suspendida: volumen, tamaño y forma de la partícula (distribución), así como de la fase de suspensión: viscosidad, tipo de deformación (flujo de cizallamiento o extensional, constante o transitorio), y el tiempo y tasa de deformación (Xu et al., 2010).

A mayor fracción de volumen y tamaño de partícula, la velocidad de corte crítica es menor, lo que conlleva a una mayor amplitud de resistencia a impactos más lentos; sin embargo, puede afectar la adherencia al tejido. Partículas con estructuras uniformes (tubulares) tienen mayor engrosamiento por cizallamiento

que aquellas que son esféricas o amorfas. Las partículas con un núcleo duro y una capa blanda son ideales para la preparación de STF de alto rendimiento (Zarei & Aalaie, 2020).

Por su parte, (Gong et al., 2014) encontraron que la dureza de la partícula es el factor dominante en la aplicación anticorte, mientras que la fricción entre los hilos del tejido juega un papel crítico en la resistencia antipunzón. Por el contrario, (Lin et al., 2019) exploran como influyen las características de la fibra en la resistencia antipunzón usando STF en telas de Kevlar® y Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE) y la concentración de la fase sólida en el STF. Encontraron que la concentración del STF y el tamaño de las partículas afectan significativamente la propiedad de resistencia a la punción, pero la resistencia al corte depende principalmente de las características de la fibra. Comparativamente, las telas compuestas STF-UHMWPE exhiben una mejor resistencia a las puñaladas pero una menor resistencia a las perforaciones con puntas que las telas STF-Kevlar®. Así, se evidencia que de acuerdo con la aplicación principal que se busque, se debe adaptar la composición del STF y el tipo de tejido.

Por otro lado, (Zhang et al., 2020) evaluaron como influye el tamaño de partícula de SiO₂ en el STF, mezclando micro y nano partículas para funcionalizar un textil de Kevlar®. Encontraron que mejora la resistencia anticorte y antipunzón cuando usaron ambos tamaños de partícula en el STF (12nm y 0,5µm), en comparación con los fluidos obtenidos con un solo tamaño de partícula. Esto demuestra que pese a que el tamaño de partícula influye en la velocidad de corte crítica del fluido, partículas de diferente tamaño pueden resultar ventajosas en la aplicación en el textil porque rellenan todo tipo de espacios existente entre los hilos. Por su parte, (Zhenqian et al., 2021) evaluaron el efecto del tamaño de partícula a escala nanométrica, mediante la elaboración de STF con SiO₂ de 12nm y 40nm, encontrando que los fluidos obtenidos con las partículas de mayor tamaño tienen un mejor efecto de espesamiento por cizallamiento y que en su aplicación en el textil de Twaron® permiten la fabricación de una armadura corporal blanda más liviana y con mayor protección ante el riesgo de perforación.

Por otro lado, (Baharvandi et al., 2014) estudia la influencia de la concentración de la fase sólida en el STF con partículas SiO₂ de diferente tamaño (12nm y 60nm), encontrando que en concentraciones menores al 25% p/p, la reducción de la partícula tiene un gran efecto

sobre la capacidad de carga de los tejidos de aramida pese a que el fluido por sí solo presenta un aumento en la viscosidad y la tasa de corte. Sin embargo, en concentraciones mayores al 35% p/p, para las partículas de 12nm y 60nm, la diferencia entre las cargas máximas soportadas por el tejido es insignificante.

Otra variable a considerar es la morfología de las partículas de la fase sólida, como determinaron (Deepak et al., 2020) en su desarrollo de STF con nanopartículas de sílice sintetizadas por dos métodos diferentes (método sol-gel y método Stôber modificado). Encontraron que la forma de la partícula afecta la viscosidad del STF y su adhesión al textil, ya que las partículas completamente esféricas mostraron mejores propiedades antipunzón en el tejido de polipropileno en comparación con las que tenían forma de escamas.

El tipo de vehículo y su peso molecular también intervienen en el desempeño del STF. Se obtiene una velocidad de corte crítica menor con medios de dispersión de alto peso molecular; sin embargo, dificulta que se impregne en el material y, por lo tanto, el rendimiento en el tejido disminuye (Wang, 2016). Los medios de dispersión de menor peso molecular tienen mejores propiedades mecánicas en el textil, ya que favorecen la fricción entre los hilos. (Baharvandi et al., 2015) encontraron que, pese a que a altas concentraciones la resistencia del STF a la punción es mejor, la suspensión es inestable y se puede presentar precipitación de la fase sólida, por lo que es necesario usar un vehículo de alto peso molecular.

Otra variable a considerar en el rendimiento de un STF, es el uso de aditivos. En el caso de (Gurgen & Kusham, 2017), usaron Carburo de Silicio (SiC) como aditivo para un STF bifásico a base de SiO₂ y PEG que logró mayor resistencia antipunzón en los tejidos impregnados respecto a los que contenía un STF monofásico. También resulta determinante la temperatura a la que el STF recibe el impacto, como lo describen (D. Li et al., 2020) en su investigación. Ellos obtuvieron el perfil reológico del STF a 20°C y a 50°C, encontrando que la viscosidad es mayor a bajas temperaturas y por lo tanto presenta una mayor resistencia antipunzón, lo que permite identificar la necesidad de mantener el textil a una temperatura baja para que no se vea afectada su función.

Los STFs tienen múltiples aplicaciones en el desarrollo de materiales de protección, absorbentes de choques (terremotos, remolinos,

fuerte oleaje), mejoramiento de sistemas de amortiguación adaptativos, disminución del impacto de vibraciones, estructuras inteligentes, chalecos antibalas y almohadillas para equipo deportivo (Zarei & Aalaie, 2020).

Un ejemplo de éstas múltiples aplicaciones, se encuentra en el estudio realizado por (Qin et al., 2019) donde desarrollaron un STF a partir de SiO₂ y líquidos iónicos (IL) para brindarle al textil una doble aplicación, haciéndolo resistente a la perforación y al mismo tiempo generando una buena conductividad.

STF en textiles con aplicación antipunzón

Los textiles de p-aramida impregnados con STF han sido ampliamente usados para la fabricación de armadura líquida (liquid armor), ya que se busca garantizar la protección personal ante disparos o estocadas con objetos cortopunzantes. Estos textiles muestran mayor resistencia a punción, manteniendo su bajo espesor y alta flexibilidad (Ding et al., s.f).

Textiles de Kevlar® y Nylon® con STF han mostrado una mejora en aplicaciones anti-punzón, de acuerdo con los estudios realizados por las Fuerzas Armadas de U.S. Las partículas con mayor dureza contribuyen a una mejor protección contra puñaladas, debido a que la energía se transfiere mejor y se genera más fricción entre las partículas y los filamentos del material (Kejing et al., 2012).

Por su parte, (Dong et al., 2010) estudian el mejoramiento del Kevlar® con nanopartículas en polvo seco, lo que implica la capacidad de controlar que la dispersión sea uniforme en el tejido. Esta problemática se resuelve usando un vehículo como agente dilatante; sin embargo, requiere que el textil se someta a secado con el riesgo de afectar la flexibilidad del mismo. Para evitar esta consecuencia, se usan aditivos como glicerina que ocasionan un aumento en el peso del producto final. Por otro lado, (Feng et al., 2014) muestran que el uso de partículas de SiO₂ en STF para la funcionalización de textiles mejora significativamente su resistencia al corte y la punción.

Los hilos en tejidos de Kevlar® impregnados con STF se convierten en un material sólido bajo impacto. Usar nanopartículas del mismo tamaño, muestra un mejor rendimiento en el impacto, absorbiendo más energía que con partículas de diferente tamaño (Dong et al., 2010).

En el caso de (Na et al., 2016), realizaron un estudio donde impregnaron textiles de aramida con STF y observaron que existe un comportamiento dependiente de la velocidad del impacto en el tejido durante la prueba de tracción uniaxial; sin embargo, el efecto del tratamiento STF fue leve y consistente con solo el efecto inherente de la naturaleza polimérica de sus fibras constituyentes, aunque la rigidez y sensibilidad al corte del tejido aumentó debido a la presencia del STF en los cambios en la velocidad de deformación.

Para garantizar que el STF tenga la composición esperada y las fases se encuentren bien dispersas en la solución, se realiza la caracterización del fluido mediante difracción de rayos X y microscopía SEM. El análisis reológico permite estudiar la deformación y el flujo de la materia bajo esfuerzo. Con el perfil reológico se determina la tasa crítica de corte frente al esfuerzo por cizalla aplicado sobre el material, de modo que se obtenga el ciclo de histéresis propio de este tipo de fluidos dependientes del tiempo (Dong et al., 2010).

Una vez se obtiene el STF, es necesario diluirlo en un solvente como etanol o acetona para facilitar el proceso de adherencia al tejido. Para impregnar el textil, puede hacerse por inmersión total del tejido en un baño con el STF (en estos casos se utiliza el foulard, donde el tejido pasa por una tina con una solución del producto y luego es exprimido mediante cilindros) o se puede aplicar el producto en la superficie, utilizando las rasquetas o los cilindros lamadores que permiten aplicar líquidos o espumas (Soliman & Hassabo, 2021).

Normalmente después de la aplicación, ya sea mediante impregnación o mediante recubrimiento es necesario pasar por el proceso de secado y/o curado del producto aplicado.

La morfología del textil impregnado es analizada por microscopía SEM, con el propósito de verificar que las partículas se encuentren dispersas uniformemente en el material. Un análisis de espesor y tensión permite determinar si el material ha sufrido cambios en el volumen y flexibilidad después del tratamiento.

Las pruebas de resistencia a las puñaladas se realizan bajo la norma estándar NIJ 0115.00 que establece el procedimiento y condiciones para la ejecución del ensayo y la validez de sus resultados (Kejing et al., 2012). Estas pruebas pueden hacerse cuasi estáticas o dinámicas, siendo la última opción la más acertada si se busca un resultado que se asemeje a un escenario real.

La norma estándar NIJ 0115.00 establece dos tipos de ensayo: uno orientado a determinar la resistencia ante objetos comunes como cuchillos de cocina, navajas, picahielos, punzones, entre otros y otro enfocado en armas improvisadas que puedan ser fabricadas en cárceles y centros de detención. Para el ensayo comercial sugiere energías de impacto entre los 24J y 36J, mientras que para armas improvisadas el valor es superior (entre 43J y 65J) (National Institute of Justice, 2020).

Para llevar a cabo el ensayo, se requiere un equipo que permita la caída de una masa con velocidad controlada sobre el textil objeto de estudio, que a su vez debe estar sobre un material compuesto de respaldo de aproximadamente 60cm (National Institute of Justice, 2020).

Para la prueba de resistencia es determinante la forma geométrica del objeto que impacta en el textil, como lo demuestran (Aliverdipour et al., 2020) en sus ensayos con cuchillos de doble filo, un solo filo y dos puntas. Encontraron que la geometría de la herramienta tiene una influencia determinante en los parámetros de apuñalamiento y la destrucción de los tejidos, ya que el tamaño y forma del desgarre difiere si el punzón es puntiagudo, redondo o triangular.

Por su parte, (W. Li et al., 2016) realizaron pruebas dinámicas de resistencia anticorte y anti-punzón en tejidos de UHMWPE (polietileno de ultra alto peso molecular) impregnados con STF de SiO₂ y PEG. Los resultados demostraron que la resistencia dinámica al pinchazo del tejido UHMWPE mejora significativamente debido a la presencia de STF, ya que disminuye efectivamente la movilidad del hilo y acelera la respuesta transversal de la tela.

También influye en los resultados de resistencia a la perforación y corte, la velocidad a la que se haga la prueba. En la investigación de (Decker et al., 2007), se realizaron ensayos a alta y baja velocidad en textiles de Nylon® y Kevlar® impregnados con STF.

Se observaron mejoras dramáticas en la resistencia anti-punzón en condiciones de carga de alta y baja velocidad, en comparación con los materiales sin tratar. Los estudios sobre el efecto de la arquitectura de la tela indican que la adición de STF brinda beneficios análogos al efecto de aumentar el número de hilos de la tela, y la adición de STF reduce principalmente la movilidad de los filamentos e hilos en la zona de impacto.

Conclusiones

El uso de STFs a partir de nanopartículas de sílice permite la optimización de elementos de protección personal antipunzón, confiriendo características excepcionales a los textiles sin afectar apreciablemente su apariencia ni sus propiedades mecánicas, por lo que existe un amplio campo de estudio para la aplicación de esta tecnología en la prevención de accidentes laborales. Aún hay un gran número de posibilidades para mejorar los tejidos a partir de STFs, con el uso de aditivos o vehículos que provean propiedades adicionales como resistencia, durabilidad, antiestática, protección UV y suavidad sin afectar la aplicación principal. Se identificaron como variables críticas del proceso de obtención del fluido, la fracción volumétrica y el tamaño de las partículas, al igual que el tipo de vehículo y textil a funcionalizar con el STF. Los estudios más recientes se han enfocado en la caracterización y análisis de las variables que influyen en la resistencia anti-punzón, ampliando el espectro de ensayos y determinantes para mejorar el desempeño final en diversas aplicaciones.

Con las nuevas tecnologías y materiales que pueden usarse dentro de este tipo de aplicaciones, aún falta investigación para mejorar las propiedades y usos de los STF en la industria, desde una perspectiva comercial y ocupacional.

Referencias bibliográficas

- Abed, M. S., & Jawad, Z. A. (2022). Nanotechnology for defense applications. En E. N. Mubarak, S. Gopi, & P. Balakrishnan (Eds.), *Materials horizons: From nature to nanomaterials* (pp. 187-205). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6022-1_10
- Aliverdipour, N., Ezazshahabi, N., & Mousazadegan, F. (2020). Characterization of the effect of fabric's tensile behavior and sharp object properties on the resistance against penetration. *Forensic Science International*, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.forsci>
- Arcos, C., Maciaz, D., & Rodríguez, J. (2007). La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂ (pp. 7-20). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-62302007000300001&lng=en&nrm=.pf&tlng=es
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Baharvandi, H. R., Alebooyeh, M., Alizadeh, M., Khaksari, P., & Kordani, N. (2015). Effect of silica weight fraction on rheological and quasi-static puncture characteristics of shear thickening fluid-treated Twaron composite. *Journal of Industrial Textiles*, 1-22. <https://doi.org/10.1177/1528083715589750>
- Baharvandi, H. R., Khaksari, P., Alebouyeh, M., Alizadeh, M., Khojasteh, J., & Kordani, N. (2014). Investigating the quasi-static puncture resistance of p-aramid nanocomposite impregnated with the shear thickening fluid. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1-9. <https://doi.org/10.1177/0731684414554635>
- Bhattacharjee, S., Joshi, R., Chughtai, A. A., & Macintyre, C. R. (2019). Graphene modified multifunctional personal protective clothing. *Advanced Materials Interfaces*, 1-27. <https://doi.org/10.1002/admi.201900622>
- Birhane, G. E., Yang, L., Geng, J., & Zhu, J. (2020). Causes of construction injuries: Review. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 1-26. <https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1761678>
- Coca Muñoz, C. A., & Thomas Argueta, M. C. (2017). Bienestar policial: Una mirada a la salud, a la seguridad ocupacional y a la prevención de los riesgos ocupacionales de los policías en El Salvador. *Policia y seguridad pública*, 2, 143-225. <https://doi.org/10.5377/rpspv.7i2.5465>
- Decker, M. J., Halbach, C. J., Nam, C. H., Wagner, N. J., & Wetzel, E. D. (2007). Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics. *Composites Science and Technology*, 565-578. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.007>
- Deepak, S., Thirumalaikumarasamy, D., Thirumal, P., T., D., Bhuvana, K. P., Bensingh, J., & Nayak, S. (2020). Preparation and characterization of shear thickening fluid coated polypropylene fabric for soft armour application. *The Journal of The Textile Institute*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.18>
- Ding, J., Li, W., & Shen, S. Z. (s.f). Research and Applications of Shear Thickening Fluids. *Materials Science and Engineering*.
- Dong, Z., Manimala, J. M., & Sun, C. T. (2010). Mechanical Behavior of Silica Nanoparticle-Impregnated Kevlar Fabrics. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 5(4), 23.
- Elles, R. D., Villabona, N., & Martelo, R. J. (2018). Occupational health and safety management in companies in the metalworking sector. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(39), 1901-1909. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.84185>
- Epp, T., & Waldner, C. (2012). Occupational health hazards in veterinary medicine: Physical, psychological, and chemical hazards. *The Canadian Veterinary Journal*, 53(2), 151-157
- Feng, X., Li, S., Wang, Y., Wang, Y., & Liu, J. (2014). Effects of different silica particles on quasi-static stab resistant properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids. *Materials and Design*, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.060>
- Fernandes, R. S., Raimundo Jr, I. M., & Pimentel, F. (2019). Revising the synthesis of Stöber silica nanoparticles: A multivariate assessment study on the effects of reaction parameters on the particle size. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 577, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.053>
- Gaoyuan, R., Hongjiu, S., & Shudong, W. (2020). The combined method to synthesis silica nanoparticle by Stöber process. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 1-19. <https://doi.org/doi:10.1007/s10971-020-05322-y>
- Gong, X., Xu, Y., Zhu, W., Xuan, S., Jiang, W., & Jiang, W. (2014). Study of the knife stab and puncture-resistant performance for shear thickening fluid enhanced fabric. *Journal of Composite Materials*, 48(6), 641-657. <https://doi.org/10.1177/0021998313476525>

- Green, D. L., Lin, J. S., Lam, Y.-F., Hu, M. Z., Schaefer, D. W., & Harris, M. T. (2003). Size, volume fraction, and nucleation of Stober silica nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 266, 346-358. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00610-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00610-6)
- Guo, Q., Huang, D., Kou, X., Cao, W., Li, L., Ge, L., & Jiangong, L. (2016). Synthesis of disperse amorphous SiO₂ nanoparticles via sol-gel process. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.133>
- Hincapie, D. F., Rojas, S., Castaño, F., Parra, K., & Giraldo, L. (2020). Mesoporous Silica Nanoparticles obtention, functionalization and biomedical applications: A review. *DYNA*, 87(215), 239-253. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.88586>
- Ind, J. E., & Jeffries, D. J. (1999). Needlestick injury in clothing industry workers and the risks of blood-borne infection. *Occupational Medicine*, 49(1), 47-49. <https://doi.org/10.1093/occmed/49.1.47>
- Kejing, Y., Haijian, C., Kun, Q., Lingling, J., & Hongshun, L. (2012). Synthesis and Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF) Impregnated Glass Fabric Composites. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, Institute of Biopolymers and Chemical Fibres, 3.
- Li, D., Wang, R., Liu, X., Zhang, S., Fang, S., & Yan, R. (2020). Effect of dispersing media and temperature on inter-yarn frictional properties of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluid. *Composite Structures*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112557>
- Li, W., Xiong, D., Zhao, X., Sun, L., & Liu, J. (2016). Dynamic stab resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fabric impregnated with shear thickening fluid. *Materials & Design*, 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.006>
- Lin, T.-T., Dai, W., Wu, L., Peng, H.-H., Zhang, X., Shiu, B.-C., & Lou, C.-W. (2019). Effects of STF and Fiber Characteristics on Quasi-Static Stab Resistant Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Impregnated UHMWPE/Kevlar Composite Fabrics. *Fibers and Polymers*, 20(2), 328-336. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-8446-6>
- Mawhlieng, U., Majumdar, A., & Laha, A. (2020). A review of fibrous materials for soft body armour applications. *Teh Royal Society of Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/c9ra06447h>
- Memon, A. H., Peerzada, M. H., Brohi, K. M., Memon, S. A., & Mangi, S. A. (2020). Performance evaluation of conventional and hybrid woven fabrics for the development of sustainable personal protective clothing. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 33835-33847. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09610-6>
- Na, W., Ahn, H., Han, S., Harrison, P., Park, J. K., Jeong, E., & Yu, W.-R. (2016). Shear behavior of a shear thickening fluid-impregnated aramid fabrics at high shear rate. *Composites Part B, Engineering*, 162-175. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.017>
- Nayak, R., Crouch, I., Kanesalingam, S., Ding, J., Tan, P., Lee, B., & Wang, L. (2017). Body armor for stab and spike protection, Part 1: Scientific literature review. *Textile Research Journal*, 1-21. <https://doi.org/10.1177/0040517517690623>
- Oza, H., Lee, M., Boisson, S., Pega, F., Medlicott, K., & Clasen, T. (2022). Occupational health outcomes among sanitation workers: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 240, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113907>
- Qin, J., Guo, B., Zhang, L., Wang, T., Zhang, G., & Shi, X. (2019). Soft armor materials constructed with Kevlar fabric and a novel shear thickening fluid. *Composites Part B, Engineering*, 1-41. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107686>
- Rahman, I. A., Vejayakumaran, P., Sipaut, C. S., Ismail, J., Abu Bakar, M., Adnan, R., & Chee, C. K. (2007). An optimized sol-gel synthesis of stable primary equivalent silica particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 294, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.08.001>
- Shi, J., Li, H., Xu, F., & Tao, X. (2021). Materials in advanced design of personal protective equipment: A review. *Materials Today Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2021.100171>
- Vasconcelos, D. C., Campos, W. R., Vasconcelos, V., & Vasconcelos, W. L. (2002). Influence of process parameters on the morphological evolution and fractal dimension of sol-gel colloidal silica particles. *Materials Science and Engineering*, A334, 53-58. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(01\)01762-2](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01762-2)
- Villano, J. S., Follo, J. M., Chappel, M. G., & Collins Jr, M. T. (2017). Personal protective equipment in animal research. *Comparative Medicine*, 67(3), 203-214.
- Xu, Y. I., Gong, X. -I, Peng, C., Sun, Y. -q, Jiang, W. -q, & Zhang, Z. (2010). Shear Thickening Fluids Based on Additives with Different Concentrations and Molecular Chain Lengths. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 5. <https://doi.org/10.1088/1674-0068/23/03/342-346>
- Yang, D., Hu, Y., Gong, X., Zhang, S., & Chen, X. (2016). Review of body armor research. *Journal of Research*, 4(6), 1-9. <https://doi.org/10.14504/ajr.4.6.4>
- Zhang, X., Li, T.-T., Peng, H.-K., Wang, Z., Huo, J., Lou, C.-W., & Lin, J.-H. (2020). Effects of bi-particlesized shear thickening fluid on rheological behaviors and stab resistance of Kevlar fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 1-16. <https://doi.org/10.1177/1528083720907400>
- Zhenqian, L., Zishun, Y., & Jiawen, Q. (2021). Effect of particle size of fumed silica on the puncture resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluid. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 16, 1-10. <https://doi.org/10.1177/15589250211061393>