



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis experimental de
fluidos no newtonianos
sometidos a impactos**

Tesis

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Rodrigo Albarrán González

DIRECTORA DE TESIS

Dra. María Soledad Córdova Aguilar



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Índice

Contenido

ÍNDICE	2
INTRODUCCIÓN	4
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	6
1.1 ESTADO DEL ARTE	6
1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
1.3 CONCEPTOS BÁSICOS	10
1.3.1 FLUIDOS	10
1.3.2 Reología.....	11
1.3.3 Viscosidad.....	11
1.3.4 Fluidos newtonianos.....	11
1.3.5 Fluidos no newtonianos	13
1.3.5.1 Fluidos plásticos de Bingham.....	13
1.3.5.2 Fluidos pseudo-plásticos.....	14
1.3.5.3 Fluidos dilatantes.....	14
1.3.5.4 Fluidos pseudo-plásticos y dilatantes con punto de cedencia.....	16
1.3.5.5 Fluidos tixotrópicos.....	17
1.3.5.6 Fluidos reopécticos	17
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	19
2.1 ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN	19
2.1.1 Recopilación bibliográfica.....	20
2.1.1.1 Artículos	20
2.1.1.2 Patentes.....	20
2.1.1.3 Normas nacionales e internacionales	21
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	22
2.3 MATERIALES Y EQUIPO	22
2.3.1 Materiales.....	22
2.3.2 Equipo.....	23
2.3 SELECCIÓN DE FLUIDOS	24
2.3.1 Elaboración de mezclas.....	24
2.3.2 Estudio reológico	25
2.3.3 Construcción de panel balístico.....	25
2.4 ENSAYO DE IMPACTO	26
2.4.1 Cañón neumático.....	26
2.4.2 Banco de pruebas.....	27
2.4.3 Cámara de alta velocidad.....	28
2.5 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CORPORAL	28
2.5.1 Prueba balística	28
2.5.2 Energía de impacto disipada.....	29
2.5.3 Penetración del proyectil.....	29

2.5.3 Prueba de flexibilidad y masa del panel balístico	30
CAPÍTULO 3: DESARROLLO	31
3.1 DISEÑO DEL SOPORTE Y PANEL BALÍSTICO	31
3.2 DISEÑO DEL CAÑÓN NEUMÁTICO	32
3.2.1 Cálculo de presión de trabajo	32
3.3 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS	34
3.3.1 Banco de pruebas y entorno seguro.....	34
3.3.2 Panel de referencia	35
3.4 CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD	36
3.5 ENSAYO DE IMPACTO BALÍSTICO	37
3.5.1 Análisis de video	38
3.6 PRUEBA DE FLEXIBILIDAD	39
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	40
4.1 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO	40
4.2 DATOS DEL ENSAYO DE IMPACTO BALÍSTICO	42
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	44
5.1 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE REOGRAMAS	44
5.1.1 Mezclas compuesta de fécula de maíz, PEG y agua.....	44
5.1.1 Mezclas compuesta de óxido de silicio, PEG y agua.....	44
5.2 CONCLUSIONES DEL ENSAYO DE IMPACTO BALÍSTICO Y DE FLEXIBILIDAD	44
5.3 CONCLUSIONES GENERALES	45
ANEXOS	46
ANEXO A: REOGRAMAS	46
ANEXO B: PLANOS	54
BIBLIOGRAFÍA	58

Introducción

Actualmente en distintas regiones del mundo existen conflictos armados de gran magnitud que, a través de estrategias militares, policiales o diplomáticas, buscan el cese de las hostilidades, y para este propósito se emplean distintas herramientas de protección como vehículos blindados, equipos de blindaje personal como chalecos y cascos antibalas, sin embargo, estos son artículos costosos y en algunos casos poco prácticos, por lo que el diseño y manufactura de sistemas de protección balística corporal y en vehículos, que sean eficientes y de bajo costo, es prioritario para la mayoría de corporaciones y dependencias de seguridad pública y privada. Para ello, la balística se desempeña como una de las disciplinas de mayor desarrollo en la industria militar y de seguridad en todo el mundo, no solo como parte fundamental en la creación de armas de fuego, proyectiles, cañones, balas inteligentes, bombas, cohetes balísticos, etc., sino que, al mismo tiempo, ha permitido la construcción y desarrollo de equipos y sistemas de defensa contra el armamento antes mencionado, como, por ejemplo, las fibras de *kevlar*® o placas de acero balístico.

Hoy en día existen diferentes sistemas de protección balística en el mercado, principalmente en chalecos antibalas, que suelen fabricarse masivamente, debido a la alta demanda de, por ejemplo, el ejército de los Estados Unidos, que tiene desplegados alrededor del planeta a más de 200 mil efectivos, con un número total de 1,400,000 elementos en servicio activo, de acuerdo al *Insider-Military & Defense* (Bender Jeremy & Gould Skye, 2014), que utilizan chalecos de diferentes características, estos pueden ser livianos y anatómicos pero que no ofrecen protección contra proyectiles disparados a corta distancia o por el otro lado, pueden ser bastante resistentes a una amplia gama de municiones y proyectiles, pero que suelen ser muy pesados y voluminosos, lo cual es contraproducente en condiciones de combate en espacios reducidos como en el terreno urbano o al interior de vehículos. Por ello se requiere desarrollar nuevo equipamiento de protección balística, que sea flexible, compacto y ligero, que sea capaz de proteger a elementos de policía, fuerzas armadas y cualquier persona expuesta a entornos peligrosos debido a impacto de proyectiles o fragmentos a gran velocidad, como trabajadores en parques industriales, pilotos y astronautas.

Pregunta de Investigación

¿Cuál es la capacidad de disipar las fuerzas de impacto de una cápsula de fluido de comportamiento no newtoniano en conjunto con fibras de alta resistencia?

Hipótesis de Trabajo

“Un fluido no newtoniano en conjunto con fibras resistentes son capaces de disipar las fuerzas de impacto de un proyectil de calibre similar a los 9 milímetros con una energía cinética equivalente a la de proyectiles de armas de fuego calibre .22.”

Justificación

La mayoría de los sistemas de protección corporal que existen comercialmente son incómodos y dificultan las labores de los elementos de seguridad, no obstante, que son capaces de detener proyectiles de alto calibre. Por otro lado, los sistemas de protección corporal ligeros, permiten el libre movimiento, pero no protegen de disparos o proyectiles a gran velocidad y a corta distancia. De la revisión bibliográfica, se obtiene un patrón de desarrollo a través de la historia de la humanidad, que refleja tanto la capacidad de perforación de los proyectiles y armas punzo cortantes como la capacidad de protección de las armaduras corporales. Estos sistemas de protección se han ajustado a las necesidades específicas, como la flexibilidad y peso, fundamentalmente. Este trabajo se propone evaluar si la presencia de un fluido no newtoniano en conjunto con fibras de alta resistencia, puede funcionar como sistema de protección o refuerzo ligero y compacto en el mismo, capaz de proteger al usuario de proyectiles disparados a corta distancia, permitiendo de este modo, al personal de seguridad realizar sus labores diarias de vigilancia e intervención de manera cómoda.

Aportación del Proyecto

Evaluación cualitativa y cuantitativa de fluidos no newtonianos que pueden ser utilizados en sistemas de protección contra impactos balísticos.

Desarrollo de tecnología de protección para elementos de seguridad y eventualmente para uso civil y/o industrial.

Objetivo

Desarrollar un arreglo de materiales que puedan ser utilizados en conjunto con fibras de alta resistencia en equipamiento antibalas, por medio del estudio de fluidos no newtonianos y ensayo balístico.

Capítulo 1: Marco teórico

1.1 Estado del arte

Muchos de los conflictos armados más grandes en la historia, fueron resultado de ataques a personas importantes, como presidentes, embajadores, líderes políticos o religiosos, o a sus naciones y/o comunidades, esto ha derivado en la búsqueda permanente del mejor armamento, de un mejor adiestramiento para sus fuerzas armadas y finalmente en mejores sistemas de protección contra proyectiles, que año con año, aumentan su capacidad de penetración, y que a su vez, resulta más complicado el detenerlos y mantener a salvo al portador de un chaleco antibalas o a los tripulantes de un vehículo blindado, para esto se requiere una investigación, experimentación, diseño y desarrollo de nuevos materiales de forma individual o compuesta con el propósito de absorber la mayor cantidad de energía cinética de un proyectil, estos sistemas no solo tienen aplicaciones bélicas, sino que es posible configurar su uso para salvaguardar la integridad de trabajadores de múltiples industrias, como el de la construcción, con artículos como cascos, máscaras, ropa y botas protectoras.

En sus inicios el blindaje personal o sistemas de protección corporal, eran usados por cazadores, éstas eran prendas compuestas de pieles o cuero, capaces de proteger al usuario de mordidas de algunos animales. Posteriormente, fueron utilizados por guerreros de civilizaciones antiguas, como los sumerios y egipcios, en escudos. El descubrimiento del cobre trajo mejoras en el armamento, pese a que este material es blando y no sustituía por completo a las armas de piedra (Montero, 1994), dejó obsoleta la indumentaria hecha de cuero, por lo que éstas, debían reforzarse con madera o con el mismo cobre para ser capaces de soportar constantes golpes y cortes producidos por piedras, lanzas y flechas con puntas de este metal. Esto promovió en gran medida el desarrollo de la metalurgia, principalmente en Grecia y Mesopotamia alrededor del 3000 A.C., lo que generó una fuerte competencia entre civilizaciones por fabricar las mejores herramientas, utensilios, armas y armaduras, dando lugar a la creación del bronce, el descubrimiento del hierro y la fabricación primitiva de pequeñas piezas de acero, materiales que mejoraron sustancialmente el rendimiento de las armas, armaduras y escudos en combate, comparado al cobre.

En el 390 A.C. los romanos perfeccionaron las herramientas usadas en combate, al construir armamento más resistente como espadas y lanzas, armaduras compuestas por placas o escamas de hierro y bronce, que permitían una eficiente protección sin perjudicar la movilidad. Adicionalmente, estas armas y armaduras se ajustaban a los soldados y a las estrategias de guerra.

Tras la caída del Imperio Romano en el 476 D.C., en la era medieval, los caballeros usaban una armadura de cuerpo completo que los protegía de las amenazas durante el combate, pero eran sumamente pesadas y limitaban el movimiento, lo que, paradójicamente, lo hacía vulnerable a constantes golpes y proyectiles. Durante este periodo, se popularizó el uso de la ballesta, ya que aumentaba considerablemente la energía de impacto y precisión comparado con el arco y flechas convencionales, razón por la cual los antiguos armeros comenzaron a combinar el cuero con placas o mallas metálicas y numerosas capas de tela para proteger a los soldados de las grandes y pesadas flechas de las ballestas.

En el siglo XV, los armeros y herreros europeos tuvieron que experimentar para obtener nuevos materiales y mejorar los existentes, lo que dio como resultado una mejora en el proceso de fabricación de espadas, armaduras y cascos de acero, al igual que otras aleaciones. Este proceso ayudó a la invención del “rifle de chispa”, artefacto basado en el cañón de bambú y el cañón de mano chino del siglo X y XII respectivamente.

Guerras consecuentes promovieron la evolución en armamento, armaduras y ciencias de materiales, sin embargo, lo que representó un gran avance en el desarrollo de nuevas tecnologías de esta índole, fueron la Primera y la Segunda Guerra Mundial. Durante la Primera Guerra Mundial, el combate en trincheras, resultó poco eficiente por el limitado avance de las tropas tanto francesas como alemanas en el “Frente Occidental”, territorio comprendido entre las fronteras de Francia, Bélgica y Alemania, que había cobrado miles de vidas, por lo que para superar ese terreno lleno de bombas y ametralladoras, se desarrollaron los primeros tanques blindados, construidos con gruesas placas de metal, capaces de transportar hasta 30 hombres que adicionalmente usaban cascos y chalecos de acero al cromo-níquel con un peso aproximado de 18 kg, capaces de proteger a los soldados de algunos proyectiles de ametralladora.

Más tarde, en la Segunda Guerra Mundial, muchas de las bajas eran debidas a las esquirlas de bombas, fragmentos de ametralladora y munición antiaérea, por lo que se optó por brindar protección contra estos fragmentos a los pilotos e infantería aerotransportada, de acuerdo con el *“Wound Ballistics in World War II”* (Maj. Beyer *et al*, 1962), el Ejército de los EE.UU. desarrolló una prenda llamada “Flak Jacket”, compuesta de Nylon y placas de acero que proporcionaba una mayor movilidad, aunque esta no era muy efectiva contra disparos directos.

Con lo anterior, se puede afirmar que existe un patrón de crecimiento y desarrollo, en el cual se refleja la capacidad de perforación de un proyectil y armas punzo-cortantes contra la capacidad de protección que tienen los sistemas de blindaje en vehículos y armaduras corporales, y de cómo éstos se ajustan a necesidades específicas, como la flexibilidad y el peso.

En México existen múltiples empresas que se dedican al blindaje de vehículos, sin embargo, estos no desarrollan la tecnología necesaria para la fabricación de los materiales empleados, sino que los importan, lo cual se ve reflejado en un precio elevado de los sistemas, que adicionalmente resultan ser poco eficientes para el uso militar y civil. La Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), es la encargada de proveer el blindaje para el Ejército Mexicano y la Fuerza Aérea, la cual se rige por exigentes normas de calidad en su diseño y manufactura, sin embargo, esta tarea se ve afectada debido al limitado presupuesto de defensa, y que debido a la política del gobierno mexicano de combate al narcotráfico y delincuencia organizada, se ha aumentado el número de tropas desplegadas que requieren de este equipamiento para llevar a cabo labores de seguridad de forma eficiente, por lo que el disponer de tecnología orientada a la protección balística en combate es fundamental.

La presente investigación parte de las bases de un artículo elaborado por el laboratorio del ejército de Estados Unidos, llamado "Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids" (Wetzel & Wagner, 2002), y otras investigaciones alrededor del mundo, las cuales buscan por medio del uso de fluidos no newtonianos, como material base, elaborar y/o complementar los actuales sistemas de protección corporal que se adapte al usuario y a las condiciones del combate.

1.2 Fundamentos teóricos

Para comprender los conceptos que se emplearon durante el desarrollo de este trabajo de investigación, es necesario en primer lugar, visualizar el comportamiento molecular de los diferentes estados de agregación de la materia, ya que, a diferencia de los sólidos, las moléculas de los fluidos no están confinadas a posiciones fijas, esta característica le permite a la sustancia, ya sea un líquido o un gas, tener la capacidad de fluir (de ahí deriva su nombre), y carece de rigidez y elasticidad, por lo que estas sustancias serán susceptibles a cualquier fuerza aplicada sobre ellas, en otras palabras, un sólido posee una forma determinada, mientras que en el caso de los gases y líquidos, requieren de un recipiente para adoptar una forma, dada por la geometría del propio contenedor, si no existe un recipiente que lo contenga, la sustancia, sea líquida o gaseosa comenzará a fluir. Para poder analizar este comportamiento se requiere una disciplina en la cual se pueda agrupar toda esta información y estudio, se le conoce como *mecánica de fluidos*, construida a través del trabajo teórico y experimental de múltiples científicos y matemáticos, a partir del siglo XVII.

La mecánica de fluidos se define como “*la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento y la interacción de éstos, con sólidos o con otros fluidos*” (Çengel & Cimbala, 2012), ésta es fundamental en áreas como la hidráulica y en la aeronáutica, sus aplicaciones son numerosas tanto en la ingeniería mecánica y civil, como en la medicina. Una vez establecido lo que es un fluido y la mecánica de fluidos, cabe preguntarse, ¿qué son los fluidos newtonianos y cuáles no lo son?, para responder apropiadamente a esta interrogante, se requiere comprender el trabajo de Isaac Newton, quien estableció las leyes fundamentales de la mecánica clásica y fue pionero en la mecánica de fluidos, cuya relación constitutiva establecida en 1687, propuso que para los fluidos a los que se le aplicaba un esfuerzo cortante, tendrá una deformación proporcional, es decir, a mayor esfuerzo aplicado al fluido, la deformación será mayor. La deformación implica que la velocidad relativa entre las capas del fluido no serán las mismas, por lo que la relación se expresa como “el esfuerzo cortante y el cambio de velocidad en el fluido son proporcionales”, Isaac Newton la nombró como la ley de viscosidad, por lo que si un fluido se comporta de esta forma, se trata de un fluido de comportamiento newtoniano, por ende, si no se cumple esta condición, se dice que es un fluido de comportamiento no newtoniano, un aspecto importante a considerar es que algunos fluidos no newtonianos son capaces de comportarse como un sólido al someterse a impactos para después, al retirarse el esfuerzo cortante, regresar a su estado original, esto se describirá a detalle más adelante.

1.3 Conceptos básicos

1.3.1 Fluidos

Se denomina como fluido a toda sustancia que se deforme continuamente al someterse a esfuerzos cortantes (tangenciales), sin importar la magnitud de éste, debido a las fuerzas cohesivas débiles que mantienen unidas a las partículas de estas sustancias.

Clasificación de los fluidos

La clasificación que se muestra en la figura 1.1, se determina de acuerdo al comportamiento del fluido bajo esfuerzo cortante y su respectiva velocidad de deformación en un flujo laminar y unidireccional a temperatura constante.

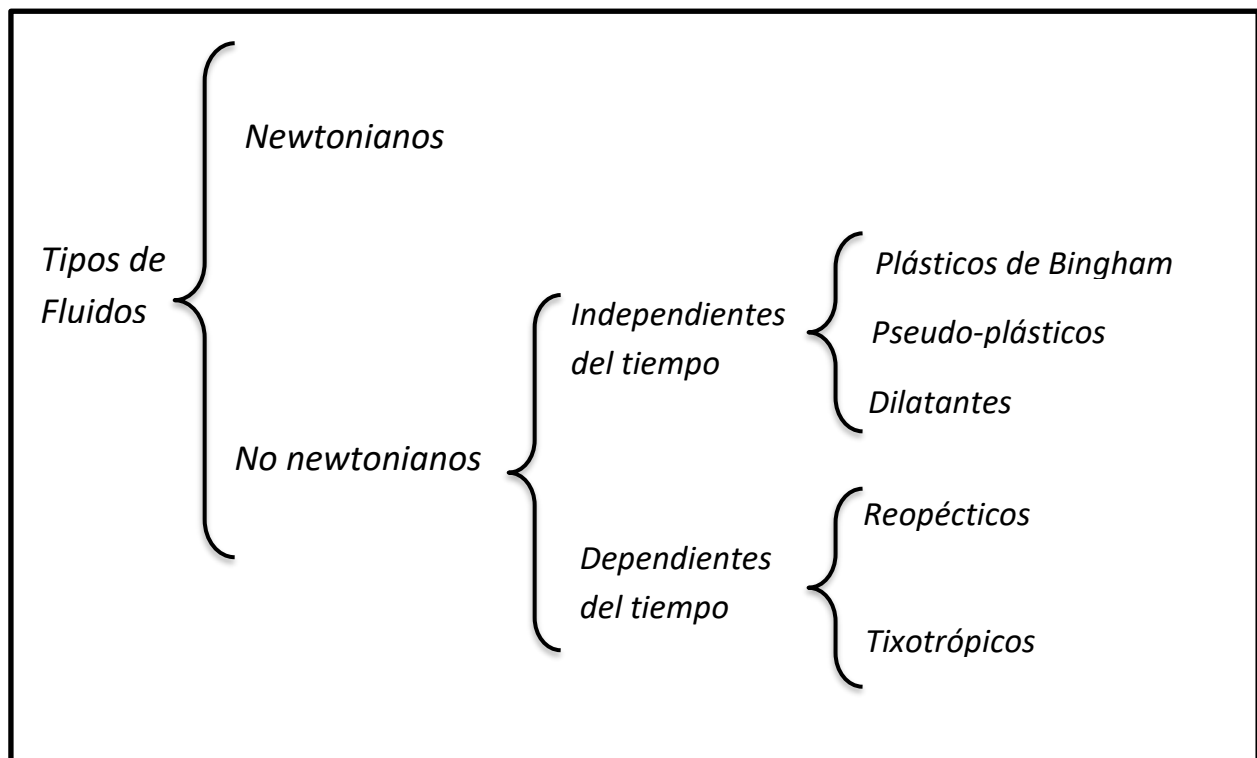


Figura 1.1 Clasificación de los fluidos.

Durante esta investigación se hace énfasis en los fluidos no newtonianos independientes del tiempo, ya que el propósito de la misma es que las características de resistencia y comportamiento mecánico que se buscan sean constantes.

1.3.2 Reología

Es la rama de la física destinada al estudio de las propiedades de los fluidos, también llamados materiales viscosos, por medio de los principios de movimiento y deformación de la materia al someterse a esfuerzo, siendo uno de los parámetros más importantes a considerar, la relación entre el esfuerzo y la deformación del fluido

1.3.3 Viscosidad

Es la resistencia de los fluidos a las deformaciones tangenciales (roce entre sus moléculas), se expresa como la relación entre esfuerzo cortante y su gradiente de velocidad, también llamada viscosidad dinámica o absoluta, representada por " μ ". Existe otra viscosidad conocida como viscosidad cinemática que se denota con " ν ", que es el cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del fluido ($\nu = \mu/\rho$), esta representa las características de la viscosidad absoluta, sin considerar las fuerzas que generan el movimiento.

1.3.4 Fluidos newtonianos

Su nombre deriva del estudio y observación que realizó el físico y matemático Isaac Newton y el cual registró en su obra "*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*" (1687), estos son fluidos en los cuales su viscosidad absoluta " μ ", se considera constante, en donde, sin importar la magnitud del esfuerzo cortante, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de desplazamiento tiene un comportamiento directamente proporcional, partiendo del origen, como se muestra en la figura 1.2.

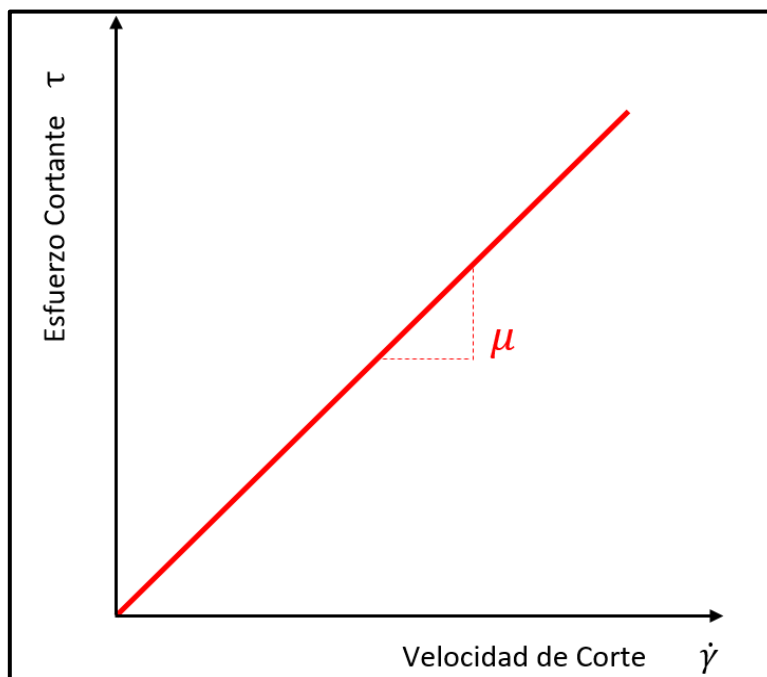


Figura 1.2 Gráfica esfuerzo cortante vs velocidad de corte de un fluido de comportamiento newtoniano.

Se considera una viscosidad constante debido a que ésta no depende del tiempo de la aplicación del esfuerzo cortante, sin embargo, esta puede variar de acuerdo a la temperatura y la presión a la que se someta al fluido.

La ecuación constitutiva se basa en el perfil de velocidad del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante, esta se expresa de la siguiente forma:

Ley de Viscosidad de Newton

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_{xy} = \mu \frac{dv_x}{dy} \dots\dots (2)$$

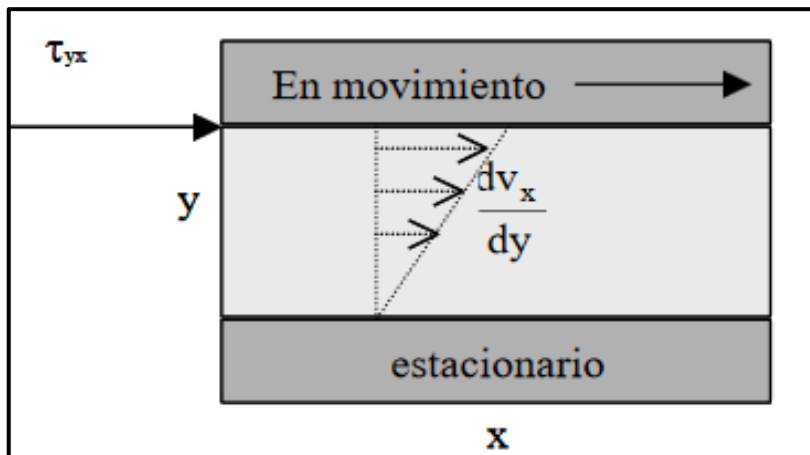


Figura 1.3 Perfil de Velocidades en un fluido newtoniano. Ilustración, *Mecánica de Fluidos* (p.13), Universidad de Alicante (2011).

En la cual sus parámetros reológicos son:

τ : Es el esfuerzo cortante o tangencial ejercido en un punto o en la superficie de estudio del fluido expresado en unidades de presión [Pa] o [N/m²], de igual forma se puede representar como τ_{xy} , es decir, el esfuerzo en el plano o superficie “y” en dirección del eje “x”.

μ : Es la viscosidad absoluta del fluido, que es el factor de proporcionalidad, para el caso de fluidos newtonianos, la viscosidad depende únicamente de la temperatura, tiene unidades [Pa·s]

$\dot{\gamma}$: Representa el gradiente de velocidad perpendicular al plano en el cual se encuentra alojado el fluido, esta tiene unidades [s⁻¹], también se representa como $\frac{dv_x}{dy}$, esto con respecto a un sistema de referencia, es decir, el cambio de la velocidad “v” en dirección de eje “x”, a lo largo del eje “y” como se ilustra en la figura 1.3.

1.3.5 Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son todos aquellos que no cumplen con la “Ley de viscosidad de Newton”, por lo que su comportamiento no será lineal, esto se debe a que la viscosidad de estos fluidos no es constante, sino que varía principalmente dependiendo de los esfuerzos cortantes y de su gradiente de velocidad. El comportamiento de estos fluidos se representa por medio de las gráficas reológicas, también llamadas reogramas, por lo que se requiere del proceso experimental con ayuda de un reómetro para su estudio.

Las curvas en una gráfica reológica son muy variadas, ya que los fluidos no newtonianos, adicionalmente a su viscosidad variable, pueden ser dependientes o independientes en el tiempo, lo que aumenta considerablemente la complejidad de su estudio y análisis. En el caso de los fluidos no newtonianos independientes en el tiempo, se clasifican como:

1.3.5.1 Fluidos plásticos de Bingham

Estos son casos ideales de fluidos no newtonianos, para éstos, es necesario ejercer un esfuerzo inicial para sobrepasar un determinado punto de cedencia " τ_0 ", una vez que se ha superado este punto, el fluido tendrá un comportamiento lineal, pero no directamente proporcional, cuya ecuación se describe como:

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu \frac{dv_x}{dy} \dots\dots\dots (3)$$

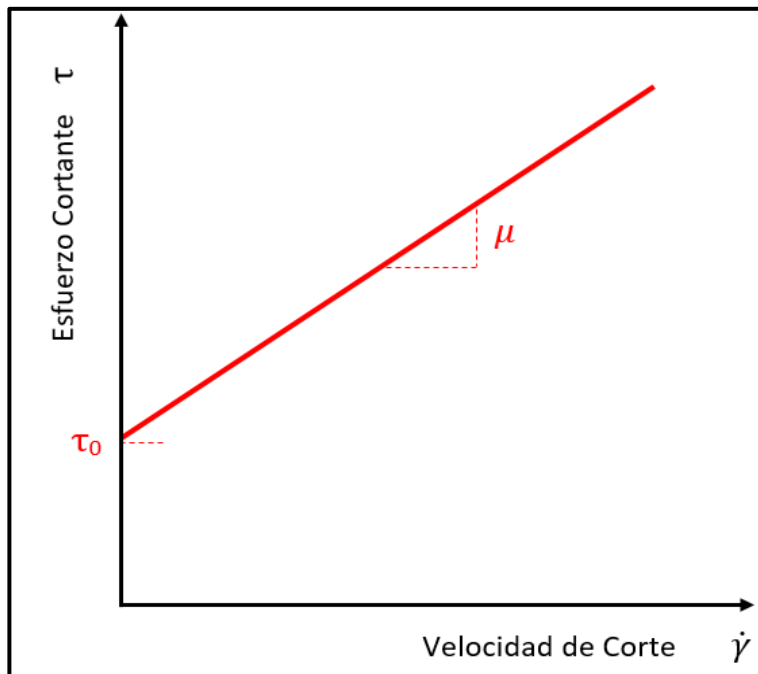


Figura 1.4 Gráfica esfuerzo cortante vs velocidad de corte de un fluido plástico de Bingham.

1.3.5.2 Fluidos pseudo-plásticos

Estos fluidos son los que, al ser sometidos a esfuerzos cortantes infinitesimales, comenzará a deformarse (ya que no poseen tensión de fluencia), en el cual, al aumentar el esfuerzo cortante, su viscosidad disminuirá, por lo que decrece su esfuerzo cortante e incrementa su velocidad de corte, en otras palabras, fluidifica.

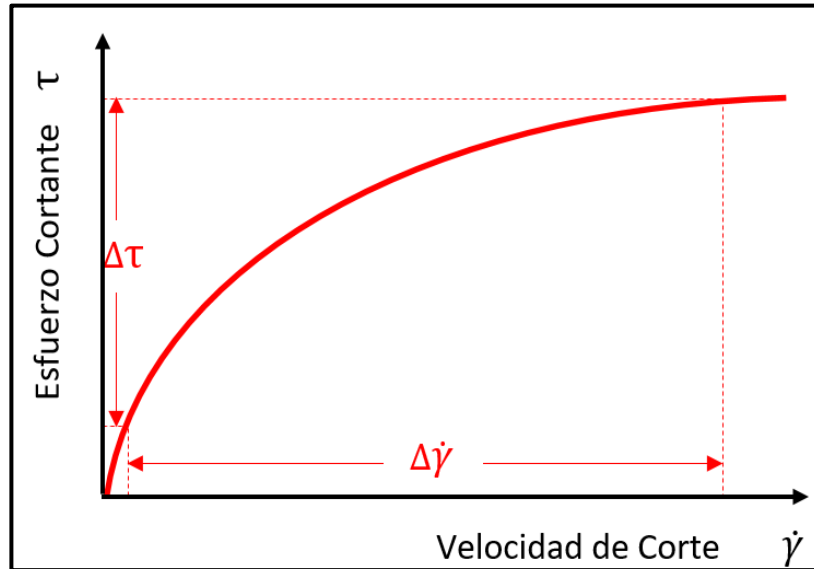


Figura 1.5 Gráfica esfuerzo cortante vs velocidad de corte de un fluido pseudo-plástico.

1.3.5.3 Fluidos dilatantes

Los fluidos dilatantes tienen un comportamiento contrario al de un fluido pseudo-plástico, es decir al incrementar el esfuerzo cortante, su viscosidad aumenta y su velocidad de corte disminuye.

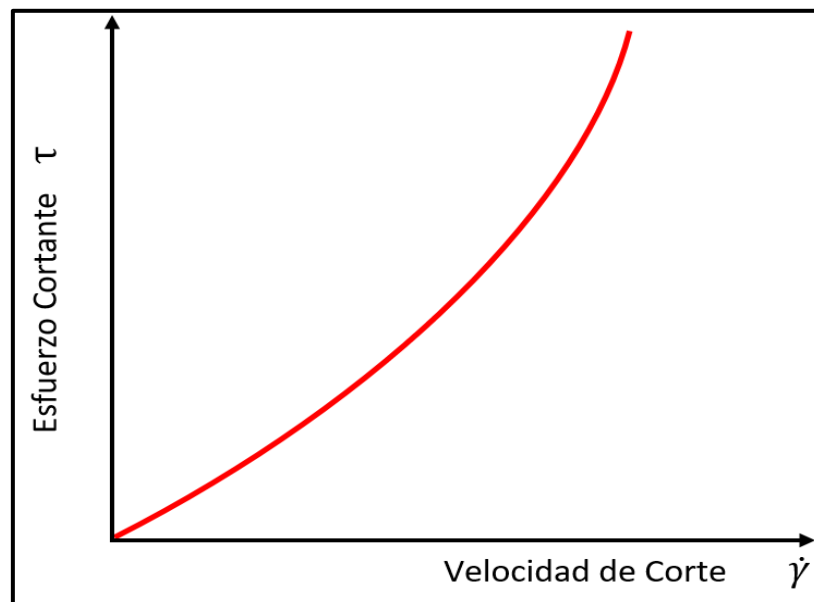


Figura 1.6 Gráfica esfuerzo cortante vs velocidad de corte de un fluido dilatante.

Para el análisis de los fluidos newtonianos, pseudo-plásticos y dilatantes, se hace uso de la ley de potencia.

Ley de Potencia

$$\tau_{xy} = k \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n \dots\dots\dots (4)$$

$$k \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{n-1} \left(\frac{dv_x}{dy} \right) = \eta \left(\frac{dv_x}{dy} \right) \dots\dots\dots (5)$$

k : Es el índice de consistencia del fluido.

n : Es el índice de comportamiento del flujo.

η : valor denominado como “viscosidad aparente” (Johnson, 1998).

El índice “K” es semejante a la viscosidad, cuyas unidades dependen de “n”, por lo que, cuanto más grande sea este valor, se dice que el fluido es más “viscoso” y viceversa, para el caso del índice de comportamiento “n”, éste representa, dependiendo de su valor, la linealidad o no linealidad del comportamiento del fluido, como se muestra en la tabla 1.1 y en la figura 1.7.

Tabla 1.1.

Valor del índice “n”	Comportamiento	Fluido
$n > 1$	Crecimiento Potencial (Ordenada)	Dilatante (No newtoniano)
$n = 1$	Lineal (por lo que $K = \mu$)	Newtoniano
$n < 1$	Crecimiento Potencial (Abscisa)	Pseudo-plástico (No newtoniano)

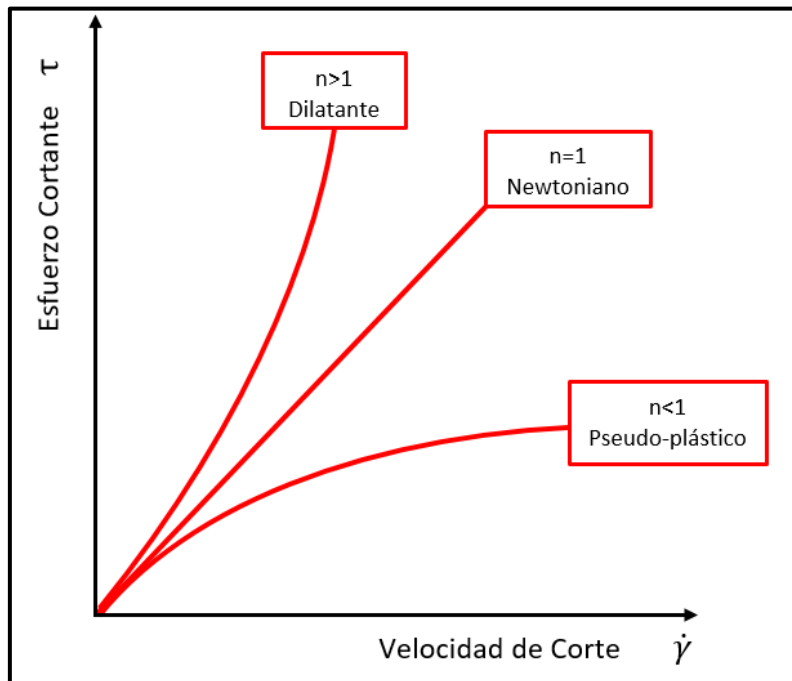


Figura 1.7 Gráfica esfuerzo cortante vs velocidad de corte comparativa de fluidos dilatantes, newtonianos y pseudo-plásticos.

1.3.5.4 Fluidos pseudo-plásticos y dilatantes con punto de cedencia

En estos casos las curvas describen un comportamiento similar al de los fluidos pseudo-plásticos y dilatantes con curvas potenciales, con la diferencia de que estas no parten del origen, ya que poseen un punto esfuerzo de cedencia inicial como en el caso de los fluidos plásticos de Bingham, por lo que varios autores se refieren a estos como “fluidos de Bingham pseudo-plásticos y dilatantes”, cuya ecuación se expresa como:

$$\tau_{xy} = \tau_0 + k \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n \dots \dots \dots (6)$$

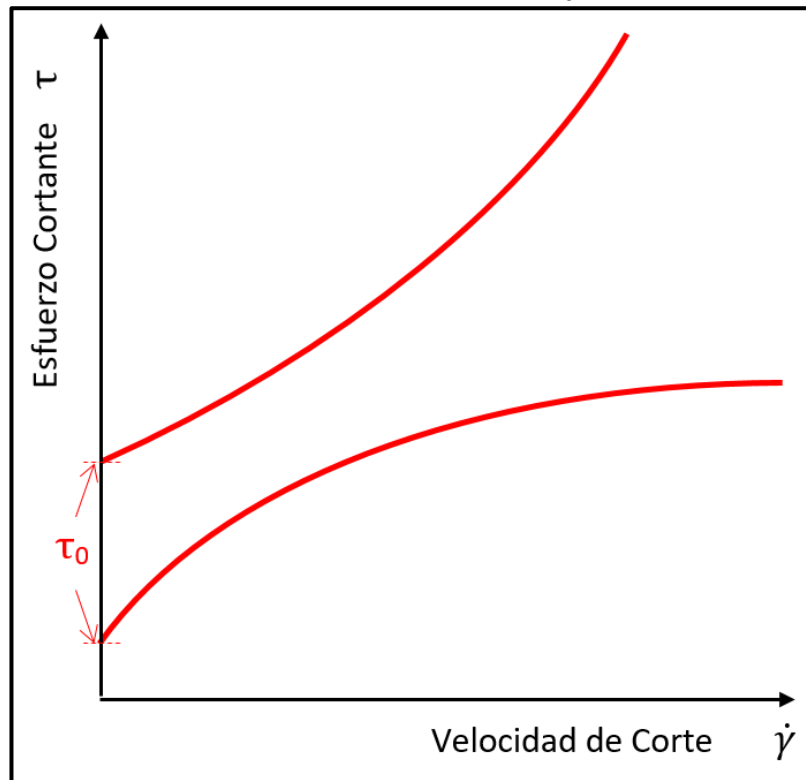


Figura 1.8 Gráfica esfuerzo cortante vs velocidad de corte comparativa de fluidos dilatantes, newtonianos y pseudo-plásticos con punto de cedencia.

Los fluidos no newtonianos dependientes en el tiempo, como su nombre lo indica, son todos aquellos fluidos en los cuales sus propiedades como su viscosidad aparente “η” y velocidad de deformación no solo depende del esfuerzo cortante, sino también, del tiempo durante el cual éste se aplique, por ende, son los fluidos más complejos para su análisis, éstos se dividen en dos grupos, los fluidos tixotrópicos y los fluidos reopécticos, el comportamiento de ambos se ilustra en la figura 1.9.

1.3.5.5 Fluidos tixotrópicos

Los fluidos tixotrópicos poseen características similares al de los fluidos pseudo-plásticos, con la diferencia de que su viscosidad aparente decrece con el tiempo en el cual se le aplica el esfuerzo cortante. Estos fluidos sufren un cambio en su estructura interna, al romperse las cadenas que forman sus moléculas cuando se les aplica un esfuerzo, hasta que se retire el esfuerzo cortante y los enlaces o cadenas se formen nuevamente.

1.3.5.6 Fluidos reopécticos

Los fluidos reopécticos, al contrario que los fluidos tixotrópicos, cuando se le somete a un esfuerzo cortante, se produce una formación de enlaces intermoleculares, que, a su vez, ocasiona un aumento en la viscosidad con el tiempo, al retirar este esfuerzo, los enlaces intermoleculares se rompen haciendo que el fluido regrese a su estado original.

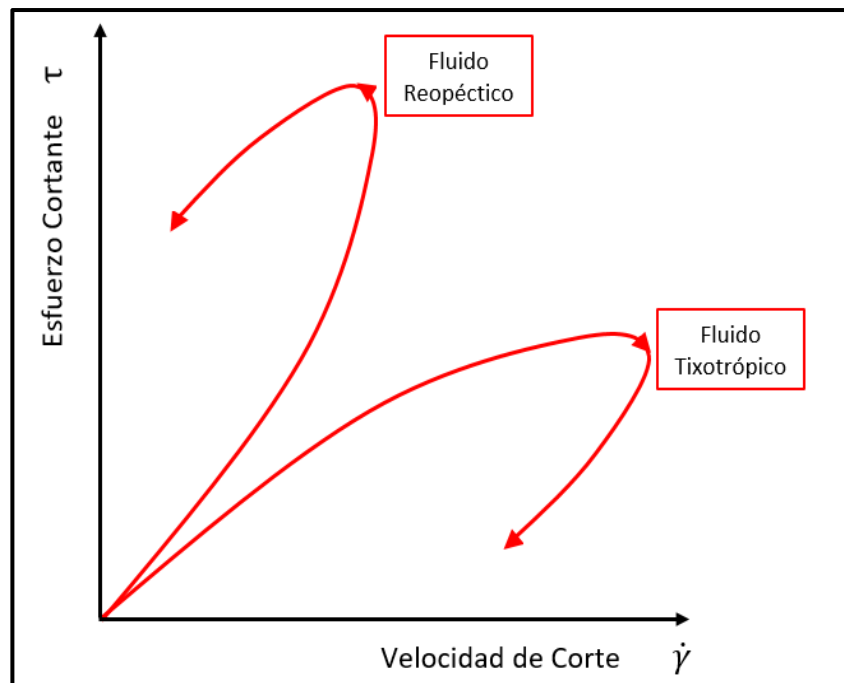


Figura 1.9 Gráfica esfuerzo cortante vs velocidad de corte comparativa de fluidos reopécticos y tixotrópicos.

El comportamiento que se busca en el fluido que se empleará para la construcción de un sistema de blindaje personal, es el de una mezcla dilatante. Algunas sustancias que poseen este comportamiento son mezclas de suspensiones coloidales. Por definición, un sistema de suspensiones coloidales, es una mezcla heterogénea formada de al menos dos fases diferentes, una denominada como fase dispersa, compuesta de pequeñas partículas (coloides), comúnmente sólidas, éstas son de un tamaño entre 10^{-9} y 10^{-5} [m], a la segunda se le conoce como fase continua, la cual se compone de un medio comúnmente líquido el cual alberga a la fase dispersa.

De acuerdo a un artículo de Raúl Esquivel (2000), las partículas coloidales tienden a agregarse y formar conglomerados debido a la presencia de fuerzas atractivas de van der Waals, por lo que las partículas son capaces de mantenerse ordenadas en suspensión. Adicionalmente, muchas de las partículas características de las suspensiones coloidales, independientemente de su forma (esférica, elipsoide, discos, varillas, cadenas, etc.) poseen una elevada relación área/volumen, también conocida como “superficie específica”, es decir, que poseen una gran superficie comparada a su volumen, y por ende, un alto coeficiente de fricción, que bajo la influencia de la gravedad, genera fuerzas de fricción que se oponen a la misma, esto da como resultado, que estos fluidos tengan un rango de sedimentación de hasta 60 años. El comportamiento dilatante de las mezclas compuestas de suspensiones coloidales, se debe a que, cuando la mezcla se encuentra en reposo o a velocidades de deformación bajas, las partículas coloidales se mantienen empaquetadas en un entorno líquido, el cual las lubrica y permite el movimiento de fluido (otorga una viscosidad aparente baja), sin embargo, como lo expone la investigación “Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids” (Wetzel & Wagner, 2002), al ser sometidas a un esfuerzo cortante súbito, las partículas coloidales, tienden a agruparse y ordenarse, desplazando gran parte del líquido que las contenía, de este modo, al no existir suficiente líquido lubricante, se produce un roce entre las partículas, que se oponen al movimiento como se ilustra en la figura 1.10, es decir, aumenta su viscosidad aparente. Para el caso específico del estudio anteriormente mencionado, se realizó un ensayo balístico sobre el fluido, y este, se comporta como un sólido, siendo capaz de detener proyectiles (haciendo uso de 4 capas de kevlar® como refuerzo y contenedor) de bajo calibre a velocidades cercanas a las del sonido (Figura 1.11).

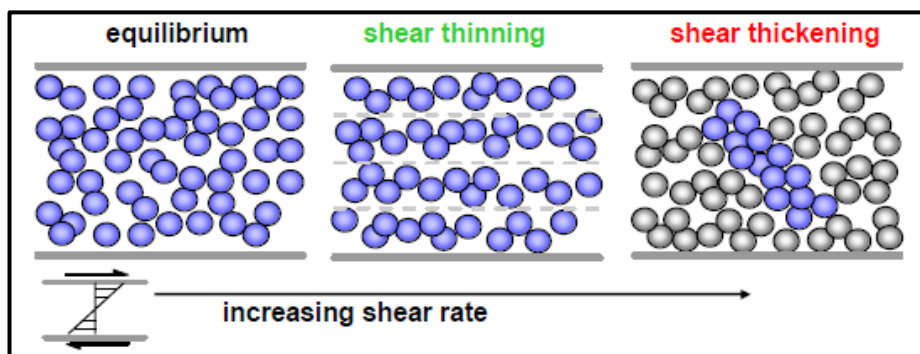


Figura 1.10 Representación gráfica de una mezcla coloidal de comportamiento no newtoniano (STF). Ilustración, *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids (STF)* (p.4), 23rd Army Science Conference, Orlando, FL (2002).

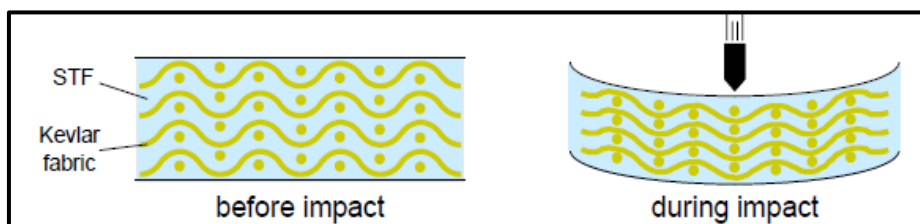


Figura 1.11 Representación gráfica de STF reforzada con capas de kevlar®, sometidas a un impacto balístico. Ilustración, *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids (STF)* (p.5), 23rd Army Science Conference, Orlando, FL (2002).

Capítulo 2: Metodología

2.1 Estrategia de investigación

Con el objetivo definido para el presente proyecto, se estableció un proceso secuencial dividido en etapas, basándose en una metodología descriptiva, como se muestra en la figura 2.1.

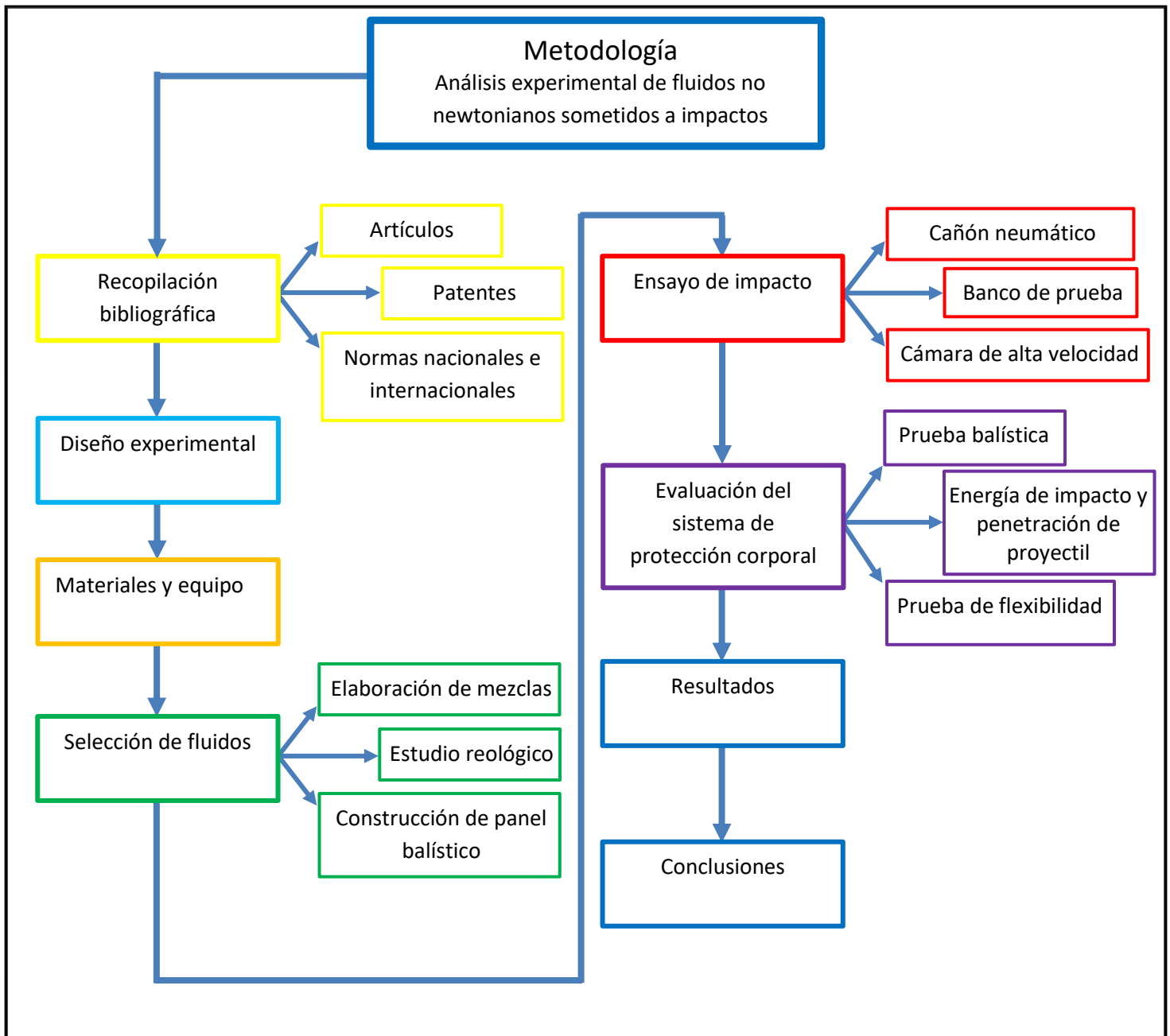


Figura 2.1 Esquema de metodología de investigación.

2.1.1 Recopilación bibliográfica

En la primera etapa, se recabó toda la información relevante para el desarrollo del proyecto, se inició con la teoría de mecánica de fluidos, siendo el tema principal, los fluidos no newtonianos, su comportamiento y su caracterización. Posteriormente se registraron tanto el método de estudio balístico sobre materiales experimentales y su capacidad de contención y protección, al igual que la metodología de prueba en la norma mexicana de calidad en chalecos antibalas.

2.1.1.1 Artículos

Como resultado de la consulta de artículos científicos, se determinó que los fluidos dilatantes, son los que poseen las mejores características mecánicas para utilizarse como parte de un sistema de blindaje personal. En su mayoría, estos fluidos se componen de suspensiones coloidales, y para el desarrollo de la presente investigación, se propusieron las siguientes opciones:

- Mezcla de fécula de maíz y agua.
- Mezclas de suspensiones coloidales, con polietilenglicol y agua.

De la revisión de información, se encontró que la concentración de agua y fécula de maíz más recomendable para este trabajo es de 52.5% en peso (Crawford *et al*, 2012).

2.1.1.2 Patentes

La búsqueda de información en portales especializados en el desarrollo de proyectos de defensa y balística a nivel mundial, se encontró una patente registrada por el laboratorio del ejército de los Estados Unidos bajo el nombre de “*Advanced body armor utilizing shear thickening fluids*” (Wetzel & Wagner, 2002), en la que reportan algunos de los materiales empleados durante el proceso experimental, y los parámetros relevantes en sus pruebas balísticas, que en resumen son los siguientes:

- Uso de partículas de óxido de silicio (sílice) como fase dispersa y una mezcla de agua y polietilenglicol como fase continua en una concentración de 55-65% en volumen, formando así una mezcla de suspensiones coloidales.
- Se construyeron distintas configuraciones de paneles balísticos para comparar su desempeño de contención de proyectiles.
- Configuración y criterios de la prueba balística.
- Pruebas de flexibilidad de los paneles.

2.1.1.3 Normas nacionales e internacionales

Para el desarrollo de esta investigación se requiere el uso de parámetros de clasificación de los niveles de blindaje, al igual que el método de prueba blindaje personal, ésta información, se encontró en la norma técnica de “Resistencia balística de armadura corporal” del Instituto Nacional de Justicia de los Estados Unidos (NIJ standard-0101.06 ballistic resistance of body armor, 2005) y de la “Norma oficial mexicana NOM-166-SCFI-2005, seguridad al usuario-chalecos antibalas-especificaciones de seguridad y métodos de prueba”:

- Clasificación de chalecos antibalas de acuerdo a su nivel de protección.
- Criterios de penetración de (máximo 40mm en material testigo).
- Materiales y equipo utilizado (Cañón de prueba, marco de sujeción).
- Criterios generales de ensayo balístico (calibres, velocidades y tipos de proyectiles y masa). como se muestra en la tabla 2.1.
- Procedimiento de ensayo balístico (número de disparos, ángulos de incidencia).

Tabla 2.1.- Niveles de protección balística en chalecos antibalas (NOM-166-SCFI-2005).

Nivel	Protección	Tipo de Arma	Munición	Características	Masa	Velocidad Media
I	Anti-Asalto		.22 LRN 	Bala de plomo con punta redonda	2.6g	329 m/s ± 9.1 m/s
			.380 ACP FMJ RN 	Bala de punta redonda con revestimiento de metal	6.2g	322 m/s ± 9.1 m/s
II-A	Anti-Asalto		9mm FMJ RN 	Bala de punta redonda con revestimiento de metal	8.0g	341 m/s ± 9.1 m/s
			.40 FMJ 	Balas de recubrimiento metálico	11.7g	322 m/s ± 9.1 m/s
II	Anti-Asalto		9mm FMJ RN 	Bala de punta redonda con revestimiento de metal	8.0g	367 m/s ± 10 m/s
			.357 Magnum 	Balas de punta suave con revestimiento	10.2g	436 m/s ± 10 m/s
III-A	Anti-Atentado		9mm 	Bala de punta redonda con revestimiento de metal	8.0g	436 m/s ± 9.1 m/s
			.44 Magnum 	Balas de punta hueca semi-cubiertas	15.6g	436 m/s ± 9.1 m/s
III	Anti-Atentado		7.62mm FMJ 	Bala de punta redonda con revestimiento de metal	9.6g	847 m/s ± 9.1 m/s
IV	Militar		7.62mm AP 	Balas con núcleo de acero templado	10.8g	879 m/s ± 9.1 m/s

2.2 Diseño experimental

Producto de la recopilación bibliográfica, se tuvo constancia de la metodología del ensayo balístico, al igual que los posibles materiales que puedan ser utilizados para formar o reforzar los sistemas de protección corporal, sin embargo, debido a que la ley federal de armas de fuego y explosivos, restringe el uso de armas de fuego por parte de civiles, impidiendo de este modo su uso en la presente investigación, adicionalmente a la complejidad que resulta al considerar la gran variedad de formas, calibres, materiales, y velocidades de impacto de la munición mostrada en la tabla 2.1, por lo que, se optó por la construcción de un cañón neumático, en el cual se pueda regular la velocidad de impacto del proyectil, manteniendo constante el calibre del mismo, reproduciendo la energía de impacto del proyectil utilizado en el estudio *“Advanced body armor utilizing shear thickening fluids”* (Wetzel & Wagner, 2002), sobre los paneles balísticos de prueba. Este proceso se aborda más adelante en sus respectivas etapas de desarrollo propuestas en la estrategia de investigación.

2.3 Materiales y equipo

2.3.1 Materiales

Fécula de maíz: Es un polisacárido obtenido, como su nombre lo indica, del maíz, el cual, al mezclarse con agua en porciones similares en peso, manifiesta el comportamiento de un fluido no newtoniano, también se le conoce como almidón de maíz.

Dióxido de Silicio (SiO_2): También llamado sílice o arena de sílice, es un material empleado principalmente en la manufactura de vidrio y materiales cerámicos, este material al pulverizarse hasta tener un tamaño del orden de micrómetros, pueden ser utilizados como suspensiones coloidales.

Plastilina Roma No. 1: Es una arcilla con base de aceite que le permite ser utilizada repetidas ocasiones sin modificar sus propiedades, es usada para moldear piezas artísticas, de igual forma, por su consistencia, similar a la del cuerpo humano, se utiliza en pruebas balísticas como “material testigo”, que, al dejar una hendidura producto del impacto del proyectil, permite medir la penetración del mismo.

Polietilenglicol (PEG): Es un poliéter de múltiples aplicaciones en la industria química, de alimentos y medicina, por sus características como disolventes, excipientes entre otras, este material se utilizó como agente dispersante para mantener la distribución de las suspensiones coloidales en las mezclas.

Tela de aramida (kevlar® 29): Es una tela fabricada de fibras sintéticas (poliamida aromática), que posee una elevada resistencia mecánica y térmica, empleada principalmente en chalecos y cascos antibalas, además de otros artículos a prueba de fuego y contra corte.

Ángulos de latón: Ángulo de latón de 25.4 mm x 25.4 mm con espesor de 3.15 mm (1x1 pulgada).

Placas de Policarbonato (PC): Placas de un material termoplástico de gran resistencia térmica y mecánica, principalmente contra impactos.

Balín de acero tipo AISI 304: Balín de acero inoxidable de alta resistencia mecánica de calibre 9.525 mm (3/8 de pulgada).

Acero AISI Cold Rolled 1018: Acero de bajo-medio carbón (0.15-0.20 % de carbono).

Manguera plástica y acopladores para la conexión neumática.

2.3.2 Equipo

Agitador Cimarec™ modelo SP131325: Agitador magnético con parrilla de calentamiento.

Balanza modelo CQT601 (ADAM®): Balanza electrónica diseñada para su uso en laboratorios, con una capacidad de 600gr X 0.1gr.

Reómetro Automático Para Physica MCR serie 101: Instrumento utilizado para caracterizar fluidos, es decir, mide la viscosidad y su relación con la rapidez de corte de un líquido, mezcla o suspensión.

Electroválvula (VUVS-L30-M32C-AD-G38-F8): Es una válvula que abre o cierra el paso al fluido de trabajo, esta válvula se acciona por medio de un campo magnético producido por una bobina externa.

Acumulador de aire comprimido (CRVZS-2): Tanque con capacidad de 2 litros, utilizado para almacenar aire o nitrógeno a una presión máxima de 16 bar.

Bobina magnética (VACF-B-B2-16B): También llamada inductor, es un componente que produce un campo magnético generando el movimiento del vástago de la electroválvula para la apertura o cierre de la misma.

Regulador de presión (LR-3/8-D-MIDI): Es una válvula de control que regula la presión de trabajo o presión máxima de operación, con un rango de operación máxima de 16 bar.

Empalme doble (NPFC-D-2G38-M): Unión de 3/8 de pulgada, diseñada para conexión de equipo neumático.

Boquilla reductora (NPFC-R-G12-G38-MF): Unión con reducción de 1/2 a 3/8 de pulgada, diseñada para conexión de equipo neumático.

Caja tomacorriente (MSSD-F): Tomacorriente compatible con bobina magnética.

Micro switch button: Interruptor de corriente alterna, 16 amperes, 125/250V.

Cámara Phantom MIRO M310: Cámara de alta velocidad con capacidad de captura máxima de 10,000 fps (fotogramas por segundo).

Compresor de aire Adir®: compresor de 2.5 HP con tanque de 25 litros.

2.3 Selección de fluidos

Esta etapa comprende la configuración, preparación y caracterización reológica de las muestras de prueba que componen al sistema de protección corporal, al igual que la construcción de los paneles que se sometieron a la prueba balística.

2.3.1 Elaboración de mezclas

Las concentraciones de las mezclas se determinaron con base a estudios realizados por investigadores e instituciones mencionados anteriormente en la etapa de recopilación bibliográfica, estos estudios reportan la proporción de los ingredientes en porcentaje en peso (% p/p), por lo que se utilizó la balanza electrónica, en la cual se pesaron todos los componentes. Las mezclas se prepararon en vasos de precipitados de 250ml, con peso total por muestra de 200 gramos, las concentraciones finales están expresadas en la tabla 2.2.

Tabla 2.2.- Concentraciones de las mezclas a base de fécula de maíz en porcentaje de masa (%p/p).

Mezcla	Fécula de maíz (%p/p)	Agua (%p/p)	PEG (%p/p)
1	52.5	47.5	0
2	52.5	46.5	1
3	52.5	45	2.5
4	52.5	42.5	5

De igual modo se elaboraron las mezclas a base de óxido de silicio, agua y polietilenglicol como se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3.- Concentraciones de las mezclas a base de óxido de silicio en porcentaje de masa (%p/p).

Mezcla	Óxido de silicio (%p/p)	Agua (%p/p)	PEG (%p/p)
5	70	30	0
6	70	29	1
7	70	27.5	2.5
8	70	25	5

Una vez que las concentraciones de las mezclas se combinan dentro del vaso de precipitados marcados para una correcta identificación y registro, se empleó un agitador magnético para la etapa de mezclado de los componentes, la velocidad de agitación determinada fue de 60 a 125 RPM y a temperatura ambiente, con el objetivo de prevenir la formación de burbujas y evaporación del agua en la mezcla, debido a que estos factores podrían afectar el comportamiento mecánico de la misma. El tiempo de mezclado varía debido a la propia concentración de la muestra, por lo que se dejó trabajando el agitador hasta que la muestra alcanzara el punto de homogeneidad.

Para la conserva de las muestras se empleó plástico auto adherente y un refrigerador con un rango de temperatura entre los 4 y 6°C, con el propósito de evitar la evaporación de agua, y mantener la concentración de mezclas lo más estable posible.

2.3.2 Estudio reológico

El estudio reológico se llevó a cabo con un reómetro, utilizando la configuración de cilindros concéntricos, el estudio se realizó por duplicado, permitiendo de este modo obtener resultados más precisos del comportamiento de cada muestra.

El reómetro se programó para realizar el estudio a 25 y 37°C como referencia de las temperaturas ambiental promedio y de la temperatura corporal.

Una vez obtenidos los resultados, se analizó y comparó el comportamiento de cada mezcla caracterizada, y de este modo, se seleccionaron las mezclas para la prueba de impacto, como se muestra en el capítulo 4.

2.3.3 Construcción de panel balístico

La construcción del panel balístico se ajusta a las características del estudio de los Estados Unidos "*Advanced body armor utilizing shear thickening fluids*" (Wetzel & Wagner, 2002), en la cual se analizó el desempeño del "fluido espesante al corte", por sus siglas en inglés, STF (Shear thickening fluids) con diferentes configuraciones de la tela de alta resistencia Kevlar®, al ser sometidas al impacto de un proyectil de fragmentación de simulación (proyectil de prueba de la OTAN) calibre .22, por sus siglas en inglés FSP (Fragment Simulating Projectiles), a una velocidad de 244 ± 9.1 m/s (825 ft/s), figura 2.3. En esta prueba se registró la penetración o "trauma" en el material testigo. La conclusión de este estudio es que la configuración "F", es decir, el panel compuesto por cuatro capas de Kevlar® inmersas en el "fluido espesante al corte", posee la mayor capacidad de contención del proyectil, por lo que se seleccionó esta configuración para el panel balístico de prueba de en esta investigación.

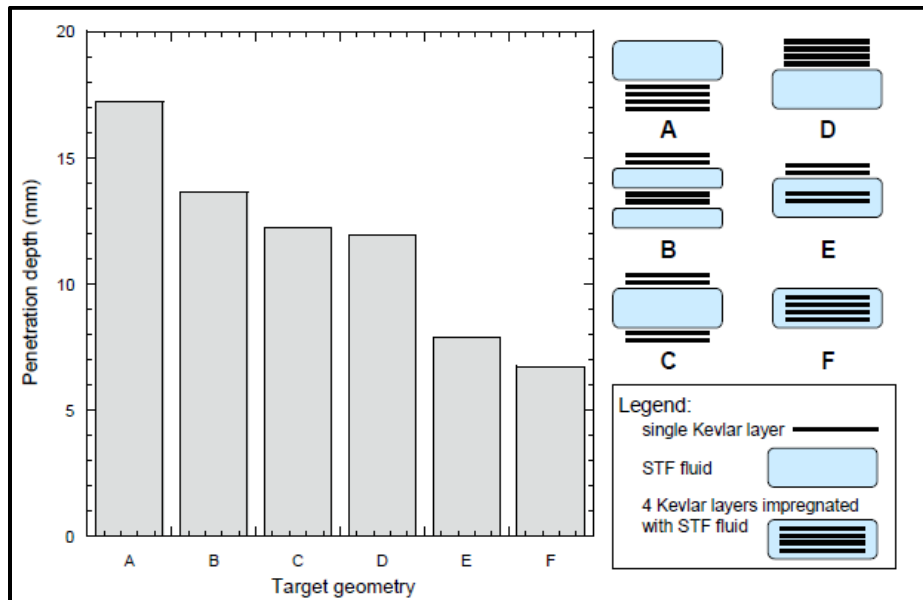


Figura 2.3 Penetración del proyectil sobre diferentes configuraciones de paneles balísticos compuestos de STF reforzada con capas de kevlar®.
 Ilustración, *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids (STF)* (p.10),
 23rd Army Science Conference, Orlando, FL (2002).

2.4 Ensayo de impacto

En esta etapa, se desarrolló todo el equipo necesario para la realización de la prueba balística.

2.4.1 Cañón neumático

Como se mencionó anteriormente, debido a la disposición de las autoridades mexicanas respecto al uso de armas de fuego y por medidas de seguridad, se diseñó el cañón y el banco de pruebas lo más compacto posible, emulando las condiciones y características se exponen en la norma oficial mexicana de seguridad al usuario de chalecos antibalas al igual que especificaciones de seguridad y otros métodos de prueba, propulsando el proyectil con aire comprimido. Con los datos obtenidos en esta norma, fue posible calcular la presión de aire necesaria para acelerar el proyectil e impactar el panel balístico a velocidades y energía de impacto similar al del proyectil de simulación "FSP".

El cañón se compone por equipo neumático que tiene la función de acumular, establecer una presión de aire constante, y liberarla para propulsar el proyectil, la configuración del cañón se muestra en la figura 2.4.

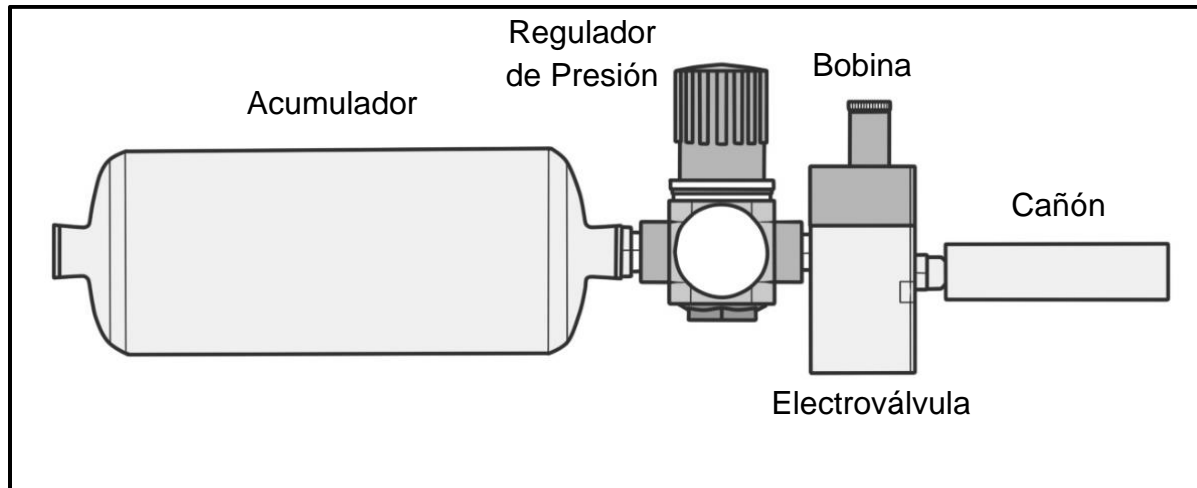


Figura 2.4 Esquema de construcción del cañón neumático.

2.4.2 Banco de pruebas

El banco de pruebas tuvo la finalidad de sostener el panel balístico y el cañón neumático, al igual que contener de forma segura, cualquier fragmento o rebote del proyectil, por lo que, se hizo uso de placas de policarbonato transparente para poder visualizar la trayectoria y el impacto del proyectil sobre los paneles balísticos, adicionalmente, se colocó un panel con longitudes de referencia que permite con ayuda de una cámara de alta velocidad, conocer la velocidad del proyectil, la geometría del banco de pruebas se muestra en la figura 2.5.

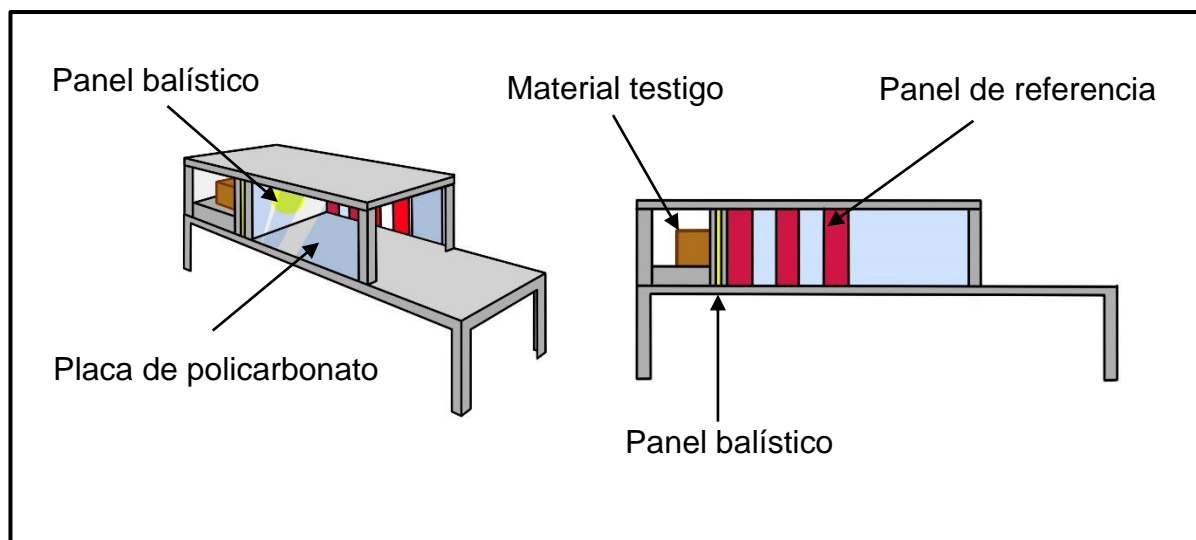


Figura 2.5 Esquema del banco de pruebas.

2.4.3 Cámara de alta velocidad

La cámara de alta velocidad tiene el propósito de registrar la trayectoria y el impacto del proyectil en el panel balístico, con esto, es posible calcular la velocidad del proyectil al contabilizar el tiempo o el número de fotogramas por segundo, que requiere el mismo proyectil para recorrer una determinada distancia, para esto último, se hace uso de una panel de referencia (también llamado panel de contraste), el cual se compone de líneas o cuadros (dependiendo del tipo de movimiento del objeto) de dimensiones definidas, con colores diferentes, como se muestra en la figura 2.6. A este procedimiento se le conoce como fotogrametría balística o de proyectiles.

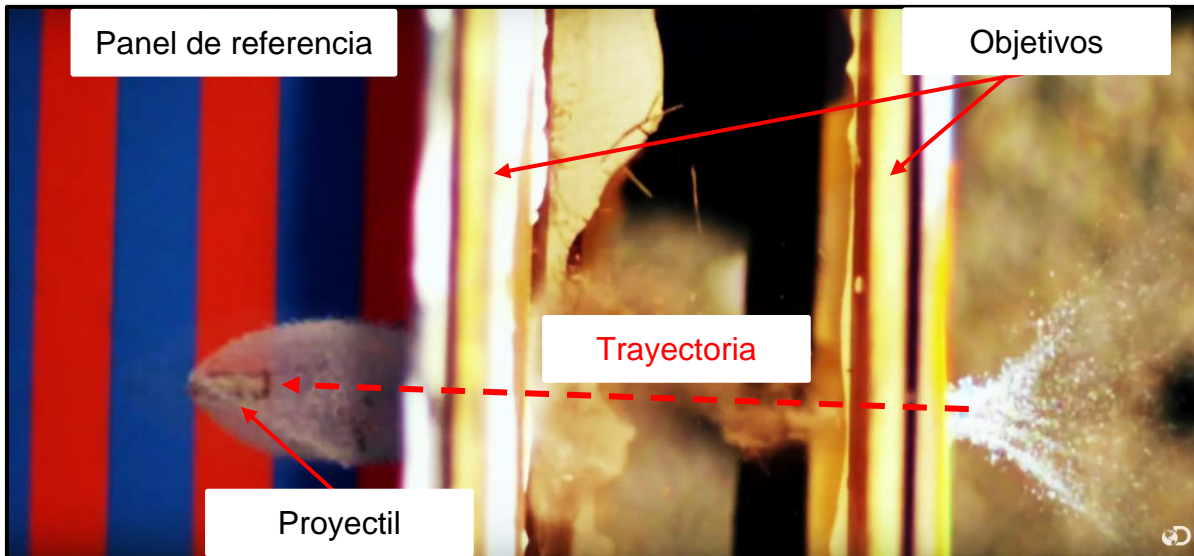


Figura 2.6 Fotograma de un ensayo balístico (fotogrametría balística).

2.5 Evaluación del sistema de protección corporal

Esta etapa, explica el método de prueba y las características relevantes para la investigación, al igual que los datos que se registraron para su análisis.

2.5.1 Prueba balística

Para el diseño de la prueba balística en la presente investigación, se utilizaron, la norma mexicana de seguridad a usuarios de chalecos antibalas (*NOM-166-SCFI-2005*), en la cual se realizan 6 disparos por cada chaleco a probar, en donde la resistencia estándar de protección corporal, no debe de igualar o sobrepasar los 40 mm de penetración en el material testigo, y los métodos de prueba empleados en la investigación experimental "Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids" (Wetzel & Wagner, 2002), es decir, se utilizó la energía de impacto derivada de la velocidad del proyectil del estudio "Advanced body armor utilizing shear thickening fluids", de 244 m/s (800 pies/s) al igual que la prueba de flexibilidad de los paneles balísticos.

Para el registro completo de los datos relevantes para esta investigación se usó la siguiente tabla.

Tabla 2.4.- Modelo de registro de resultados.

Panel balístico	Velocidad de Impacto [m/s]	Velocidad residual [m/s]	Energía de impacto disipada [J]	Penetración de proyectil [mm]

2.5.2 Energía de impacto disipada

La energía de impacto se registró, con ayuda del análisis por fotogrametría balística, ya que en función de la velocidad final del proyectil (antes de contactar el panel balístico), se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{m_p \cdot (v_f^2 - v_r^2)}{2} \dots\dots\dots (7)$$

En donde:

E_c : Es la energía cinética o energía de impacto del proyectil [J].

m_p : Es la masa del proyectil [kg].

v_f : Es su velocidad final del proyectil previo al impacto [m/s].

v_r : Es su velocidad residual del proyectil posterior al impacto [m/s].

2.5.3 Penetración del Proyectil

La penetración del proyectil o “trauma” se registró por medio del material testigo (plastilina Roma No. 1), esta mantiene la deformación causada por el impacto del proyectil como se muestra en la figura 2.7, al terminar la prueba, se mide esta depresión, de acuerdo a la norma mexicana de seguridad a usuarios de chalecos antibalas (*NOM-166-SCFI-2005*), esta depresión no debe ser igual o mayor a los 40mm para considerarse un sistema de protección corporal efectivo.



Figura 2.7 Penetración del proyectil (trauma) en material testigo. Ilustración, *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids (STF)* (p.8), 23rd Army Science Conference, Orlando, FL (2002).

2.5.3 Prueba de flexibilidad y masa del panel balístico

Como su nombre lo indica, la prueba tuvo el propósito conocer la capacidad del panel balístico adicionado con las mezclas de fluido de comportamiento no newtoniano a doblarse, y compararlas con respecto al panel de control compuesto únicamente de kevlar®, así mismo, se comparó la masa de los paneles de composición con fluidos no newtonianos contra el de control para conocer en qué porcentaje, aumenta la masa. Esta prueba se basa en la investigación experimental “Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids” (Wetzel & Wagner, 2002), cuyos criterios se muestran en la imagen 2.8.

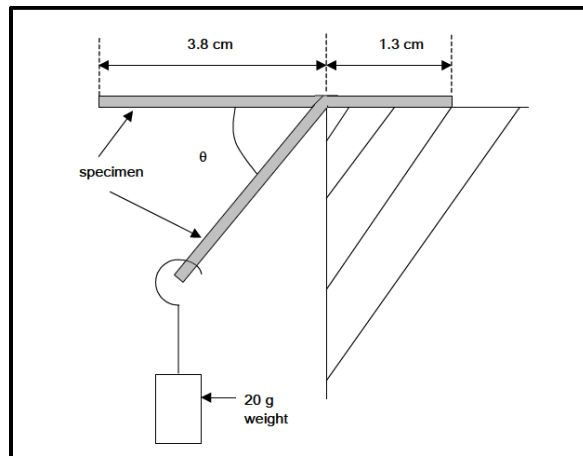


Figura 2.8 Prueba de flexibilidad de los paneles balísticos.
 Ilustración, *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids (STF)* (p.3),
 23rd Army Science Conference, Orlando, FL (2002).

Debido a que los paneles balísticos construidos son más grandes que los utilizados en la investigación experimental “Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids”, se recorrieron los paneles de tal modo que la distancia suspendida del mismo fuera de 3.8 cm.

El modelo utilizado para el registro de los datos referentes la flexibilidad se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.5.- Modelo de registro de prueba de flexibilidad.

Panel balístico	Masa [g]	Espesor [mm]	Ángulo de flexión [J]

Capítulo 3: Desarrollo

3.1 Diseño del soporte y panel balístico

El panel balístico se compone de cuatro capas de kevlar® 29, con una geometría cuadrada de 10 cm de largo, la cual tendrá un área circular expuesta para el ensayo balístico de 8 cm de diámetro como se muestra en la figura 3.1.

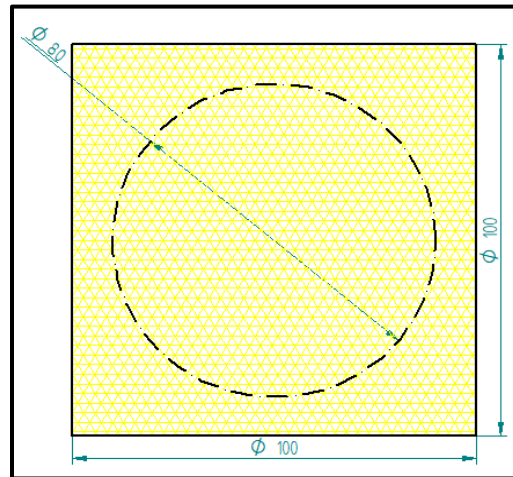


Figura 3.1 Capa de kevlar® que compone al panel balístico.

Estas capas se unieron en su perímetro con hilo de kevlar® 29, adicionalmente, ya que estas capas se impregnaron con 8 mililitros de la mezcla de comportamiento no newtoniano, se forraron con una capa de cinta adhesiva, para evitar que la muestra se disperse fuera del panel.

Para mantener el panel balístico en una misma posición, se diseñó un soporte el cual dos placas de 14.5cm x 30cm x 0.6 cm de aluminio, unidas con tornillos (sin que éstos atraviesen el panel balístico), una de estas placas tiene cortes que permiten una mejor sujeción del panel y evite que el panel se suelte durante el ensayo de impacto.

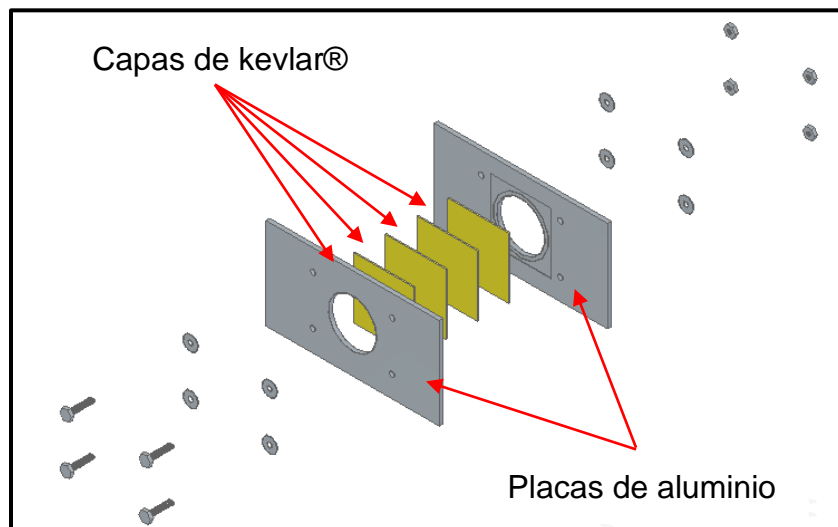


Figura 3.2 Esquema ensamble de soporte y panel balístico.

3.2 Diseño del cañón neumático

3.2.1 Cálculo de presión de trabajo

El diseño del cañón, comenzó con el análisis y cálculo de la energía de impacto, se tomó como referencia, las características de un proyectil de fragmentación de prueba (FPS) calibre .22. Una vez obtenida la energía de impacto de este proyectil, se sustituyó el calibre y masa de éste por una bala de acero calibre 0.9525mm (3/8 de pulgada) y masa 3.50 g, con estos datos y al despejar la velocidad en ecuación 7 (energía cinética o de impacto), se calculó la velocidad final en con la que el proyectil debe de impactar al objetivo.

$$v_f = \sqrt{2 \frac{E_c}{m_p}} \dots \dots \dots (8)$$

Con las velocidades ya determinadas, se realizó un análisis considerando que el proyectil al ser propulsado, describe un “movimiento uniformemente acelerado” (MUA), y conforme a éste, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$MUA \begin{cases} a = a_p \text{ [m/s}^2\text{]}. \dots \dots \dots (9) \\ v_f = a_p t + v_i \text{ [m/s]}. \dots \dots \dots (10) \\ x_f = \frac{a_p}{2} t^2 + v_i t + x_i \text{ [m]}. \dots \dots \dots (11) \end{cases}$$

Debido a que el proyectil parte del reposo, el valor de la velocidad inicial “ v_i ” es igual a cero, al remplazar este valor y despejar el tiempo “ t ” de la ecuación 10 y sustituirla en la ecuación 11, se obtiene la siguiente expresión:

$$x_f = \frac{v_f^2}{2a_p} + x_i \dots \dots \dots (12)$$

La distancia propuesta desde el fondo del cañón, (posición inicial), hasta el final del mismo es de un 15 cm, es decir, $x_f - x_i = 0.15$ m, por lo que, al sustituir este valor y despejar la aceleración del proyectil “ a_p ”, la ecuación resultante es:

$$a_p = \frac{v_f^2}{2*0.15} \dots \dots \dots (13)$$

Finalmente, para obtener la presión necesaria para propulsar y alcanzar la aceleración del proyectil, se realizó un diagrama de cuerpo libre, como se muestra en la figura 3.3, en ésta, se llevó a cabo un análisis en estado estático de la bala, entre la fuerza producto de la aceleración del proyectil “ a_p ”, y su masa “ m ”, aplicada en sentido inverso y el empuje del aire comprimido sobre el área de contacto de la bala.

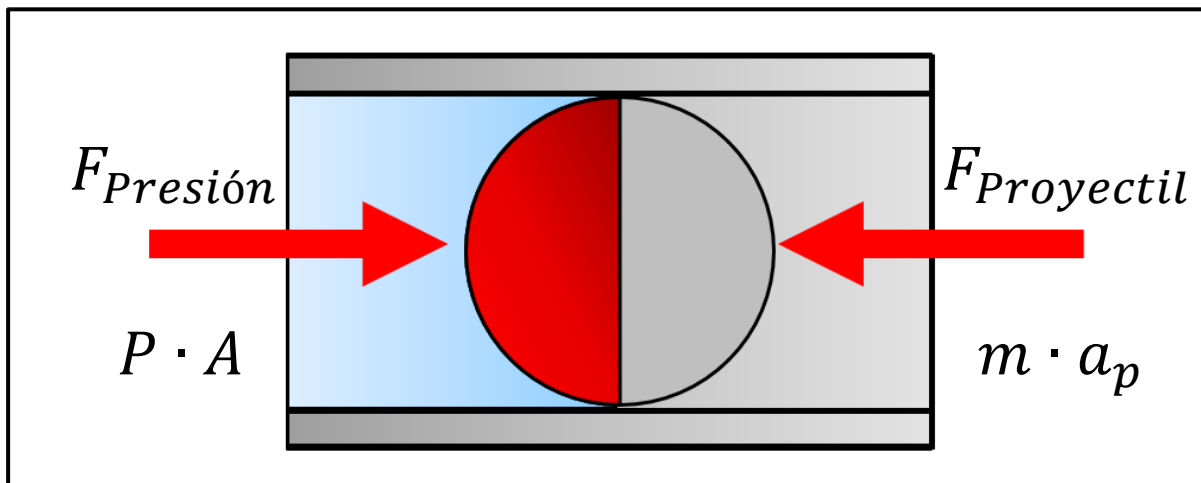


Figura 3.3 Diagrama de cuerpo libre de bala en cañón

$$F_{Presion} = F_{Proyectil}$$

$$P \cdot A = m \cdot a_p \dots\dots\dots (14)$$

En donde:

P: Es la presión de aire [Pa].

A: Es el área de la bala que contacta con el aire presurizado dentro del cañón[m²].

Al despejar P, se obtiene la siguiente expresión:

$$P = \frac{m \cdot a_p}{A} = \frac{m \cdot a_p}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \dots\dots\dots (15)$$

Con las ecuaciones 7, 8, 13 y 15, se calcularon los parámetros necesarios para el diseño del cañón neumático.

Tabla 3.1.- Valores de diseño para cañón neumático.

Proyectil	Energía de Impacto [J]	Velocidad de Impacto [m/s]	Aceleración de proyectil [m/s ²]	Presión de trabajo [kPa]
.22 FSP*	32.74	137.32	59,853.33	1,469.96

*Proyectil de prueba experimental de referencia FSP (Standard Fragment Simulation Projectile)

Una vez determinados los valores de diseño para el cañón, se adquirió el equipo especializado que posee una presión de operación máxima es de 16 bar, adicionalmente se construyó un cañón de 15 cm de longitud, proporcionando una mayor precisión para un impacto efectivo del proyectil sobre el panel balístico.

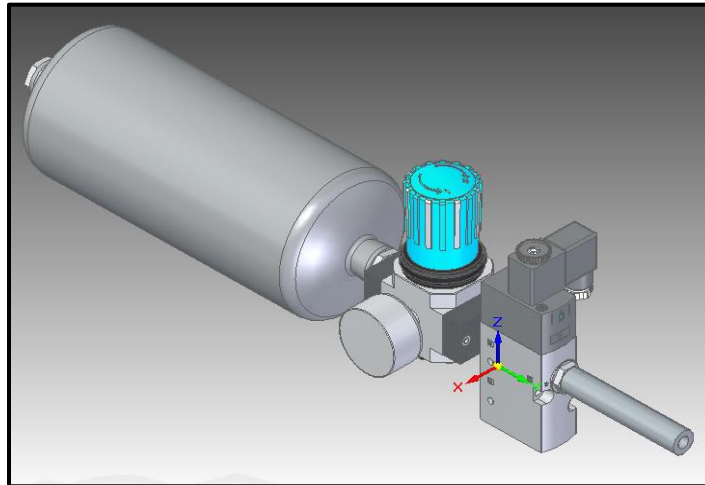


Figura 3.4 Cañón neumático ensamblado.

3.3 Diseño del banco de pruebas

3.3.1 Banco de pruebas y entorno seguro

El banco de prueba se construyó una base soporte el cañón neumático y se diseñó una cámara de seguridad o “entorno seguro” el cual sostuvo el panel de referencia, el panel balístico y el material testigo. Esta estructura se compone de un prisma rectangular con placas de policarbonato de alta resistencia, sostenidas en los bordes y en las esquinas con ángulos de latón, como se muestra en la figura 3.5.

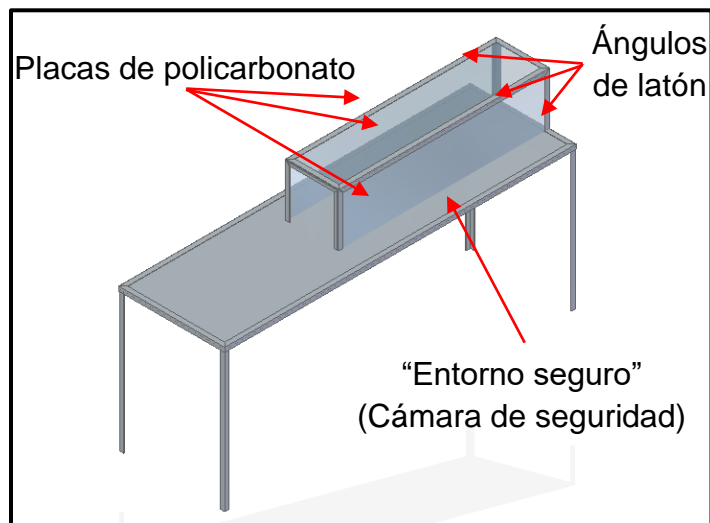


Figura 3.5 Banco de pruebas.

Se montó el cañón neumático y el panel balístico en el banco de pruebas, se fijó a una distancia de un metro entre la boca del cañón y el panel balístico.

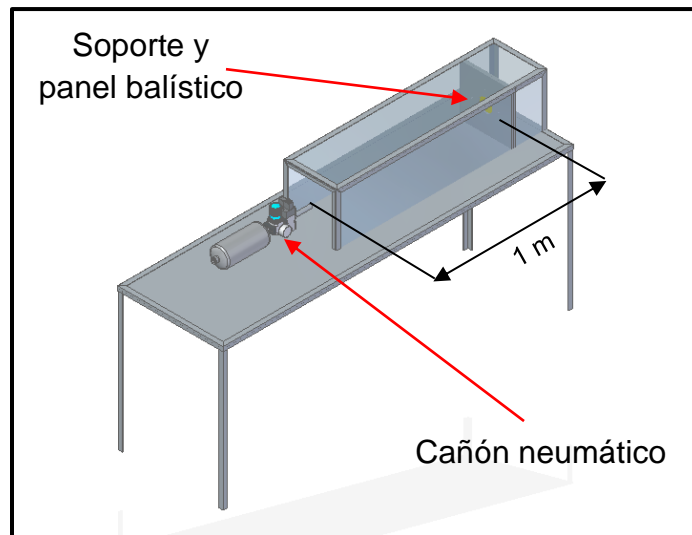


Figura 3.6 Banco de pruebas (montaje completo).

3.3.2 Panel de referencia

El panel de referencia se construyó a partir de cartulina de color amarillo y negro, estos colores se seleccionaron para producir el contraste suficiente para que la cámara pueda realizar una captura de imágenes en las que se pueda visualizar claramente el desplazamiento del proyectil (los colores dependen de la iluminación, tipo de cámara de alta velocidad y experimento a capturar), las dimensiones del panel se muestran en la figura 3.7

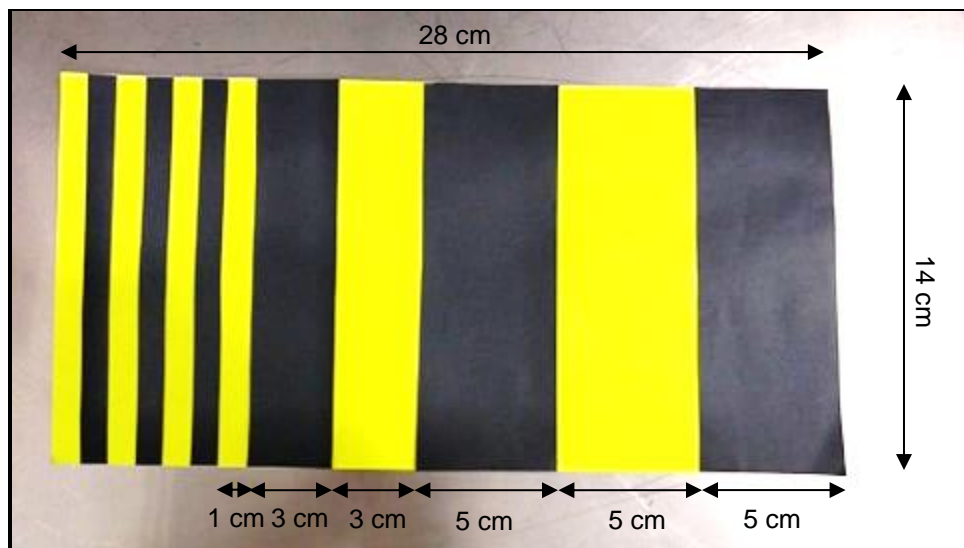


Figura 3.7 Panel de referencia.

3.4 Configuración de la cámara de alta velocidad

La cámara de alta velocidad, con ayuda de un trípode, se colocó a una distancia de 52.5cm entre el lente de la cámara y la cara lateral de la placa de policarbonato como se muestra en la figura 3.8, haciendo un enfoque automático al panel de contraste, la cámara se configuró para capturar 10,000 fotogramas por segundo a una resolución de 768 x 200 pixeles. Adicionalmente se colocó en una placa superior de policarbonato en el entorno seguro una lampara de led para iluminar la toma.

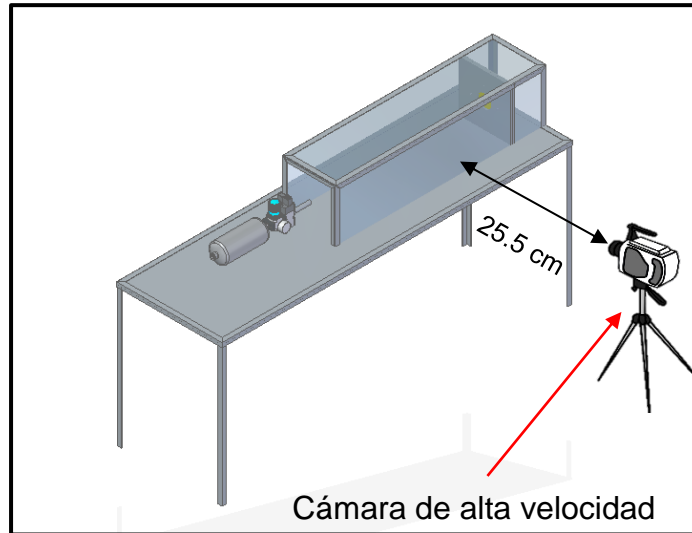


Figura 3.8 posicionamiento de la cámara de alta velocidad con respecto al banco de pruebas.

Para el cálculo de la velocidad del proyectil por medio del video de la cámara de alta velocidad, se utilizó un *software* de video (VLC Media Player) para separar todos los fotogramas individuales que lo componen. El cálculo consistió en, como se muestra en la ecuación 16, el conteo de fotogramas y el desplazamiento del proyectil, es decir, el número de fotogramas tardó en recorrer una distancia determinada, y el número de fotogramas por segundo al que se configuró la cámara.

$$v_{f R} = \frac{D}{R * N_{Fot}} \dots\dots\dots (16)$$

En donde:

$v_{f R}$: es la velocidad final real del proyectil [m/s]

D : Es la distancia recorrida por el proyectil (basándose en el panel de referencia) [m]

R : Configuración de captura de la cámara $\left(\frac{1}{10000}\right)$ [seg/fps]

N_{Fot} : Numero de fotogramas que tardó en recorrer el proyectil la distancia “ D ” [fps]

3.5 Ensayo de impacto balístico

Como se mencionó anteriormente, el ensayo balístico consistió en 6 disparos por panel a una presión de 14.70 bar, registrando en video el disparo y la penetración del proyectil en el material testigo en cada evento. Se utilizó un panel balístico de control compuesto de 4 capas de kevlar® 29 sin ninguna mezcla de comportamiento no newtoniano, un panel con la mezcla seleccionada de fécula de maíz y el último panel con la mezcla de óxido de silicio.

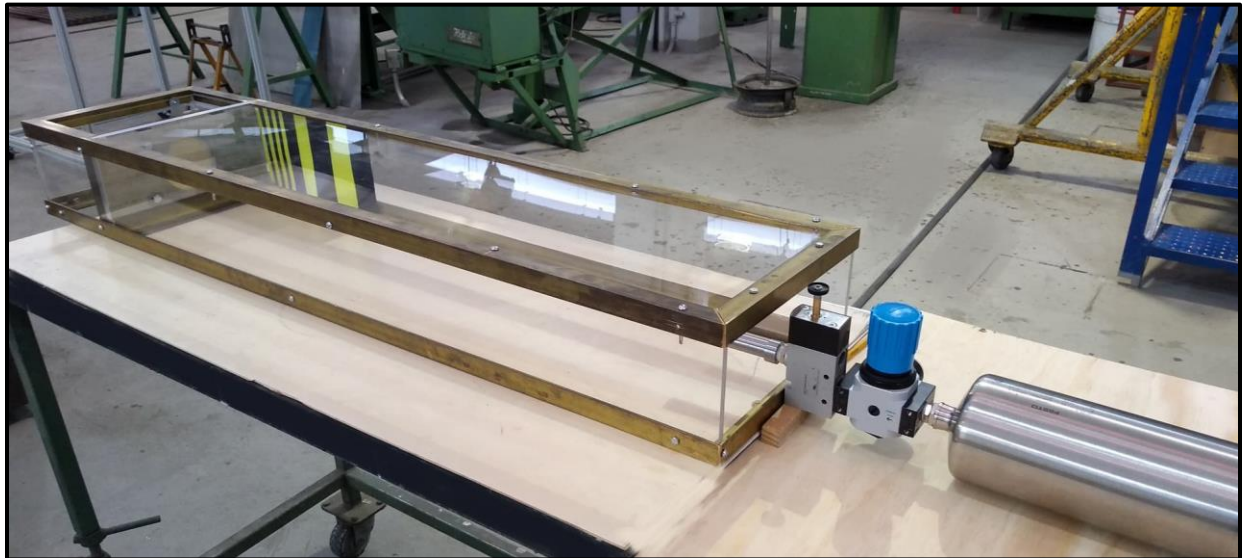


Figura 3.9 Montaje completo de banco de pruebas.

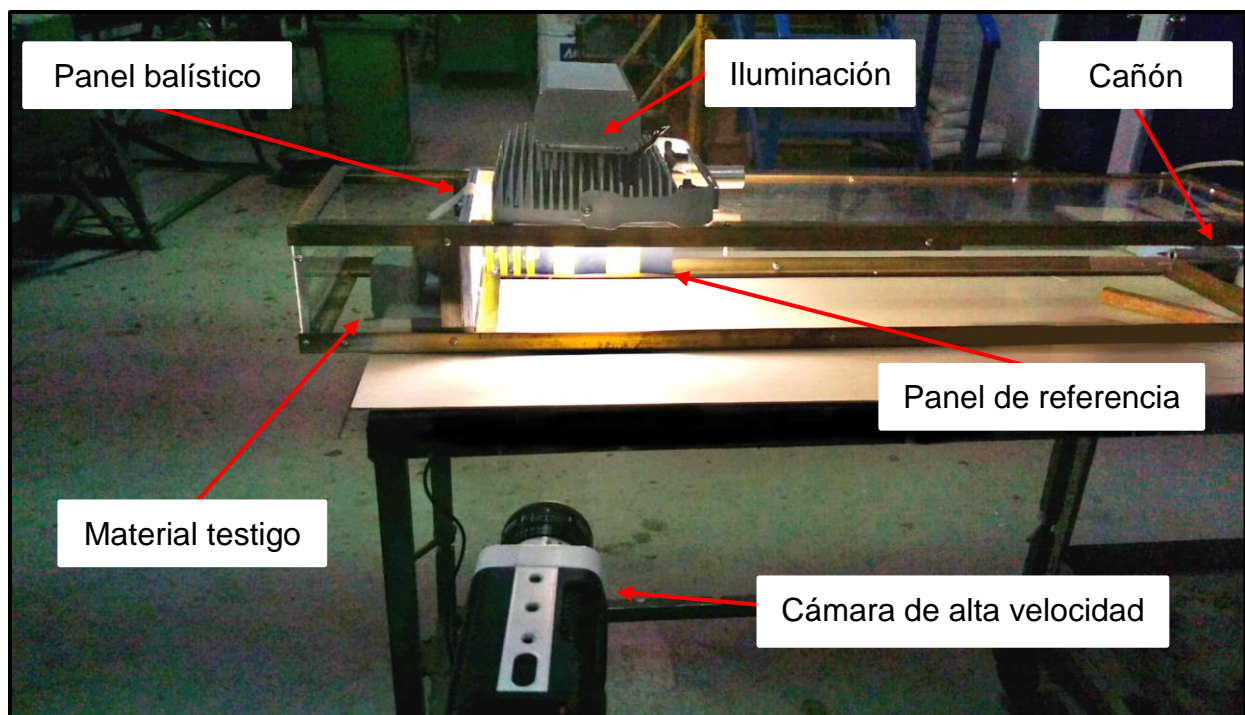


Figura 3.10 Montaje completo de banco de pruebas con cámara de alta velocidad.

3.5.1 Análisis de video

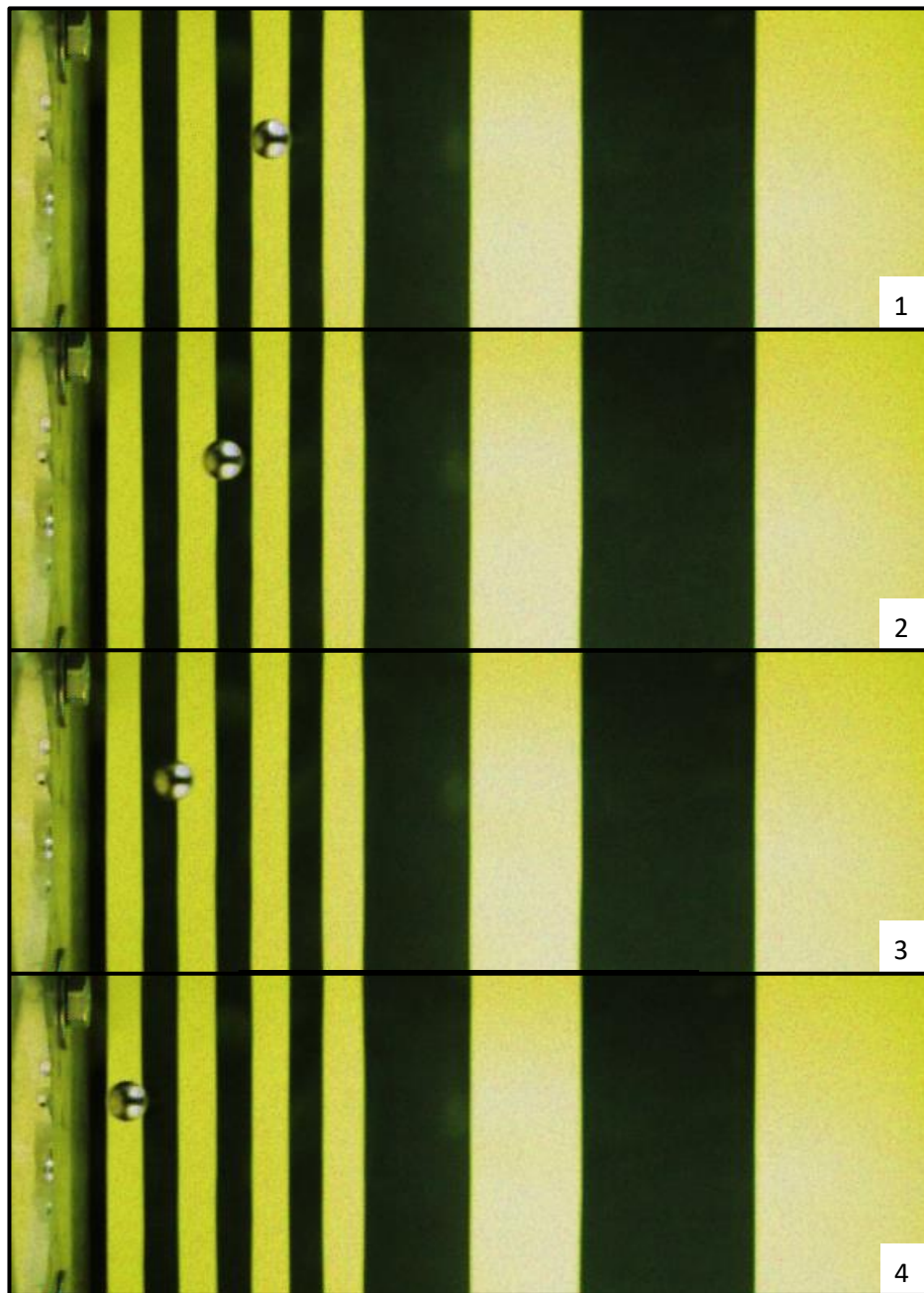


Figura 3.11 Secuencia de desplazamiento del proyectil a 10,000 fotogramas por segundo.

3.6 Prueba de flexibilidad

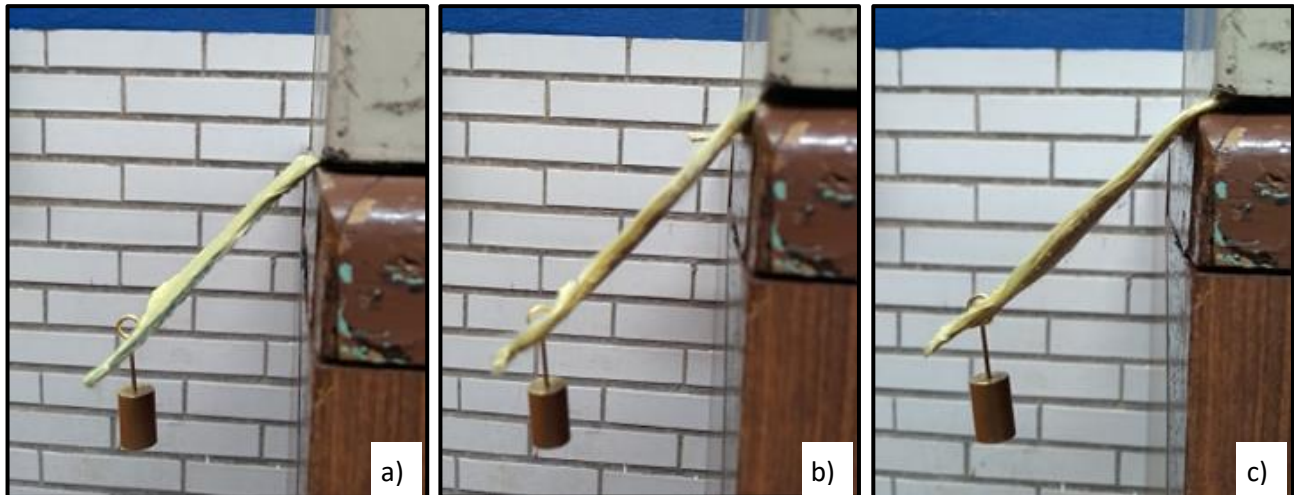


Figura 3.12 Paneles balísticos en prueba de flexibilidad con una pesa de 20 gramos
a) Panel de Control, b) Panel con fécula de maíz (mezcla 3), c) Panel con oxido de silicio (mezcla 7).

Capítulo 4: Resultados

4.1 Comportamiento reológico

Los reogramas muestran el comportamiento de los fluidos con diferentes concentraciones resultado del estudio reológico, las figuras 4.1 y 4.2, muestran el comportamiento de las mezclas compuestas de agua, fécula de maíz y PEG a 25 y 37°C respectivamente.

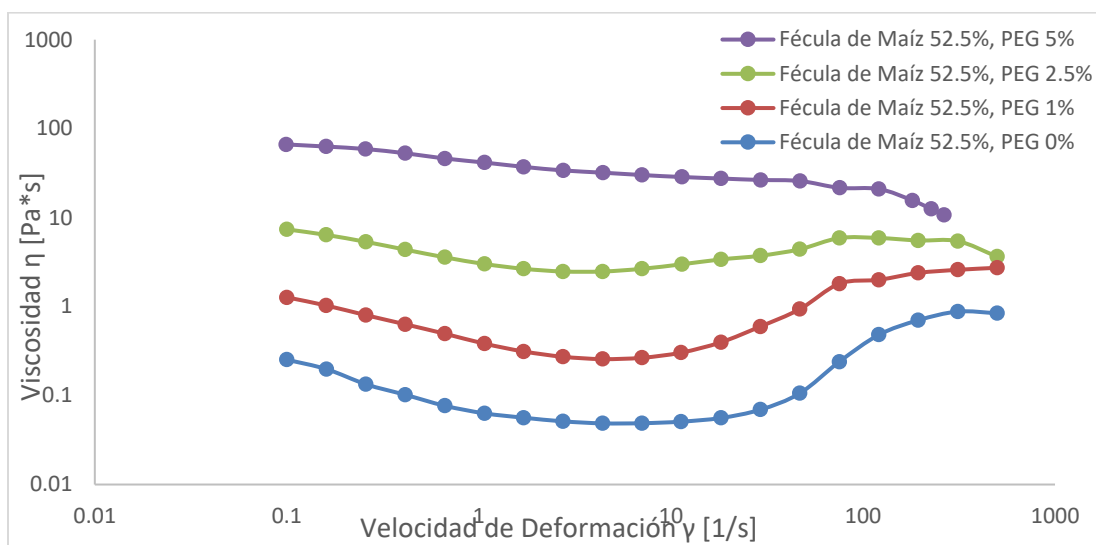


Figura 4.1 Reograma de muestras de concentración de fécula de maíz, PEG y agua a 25°C.

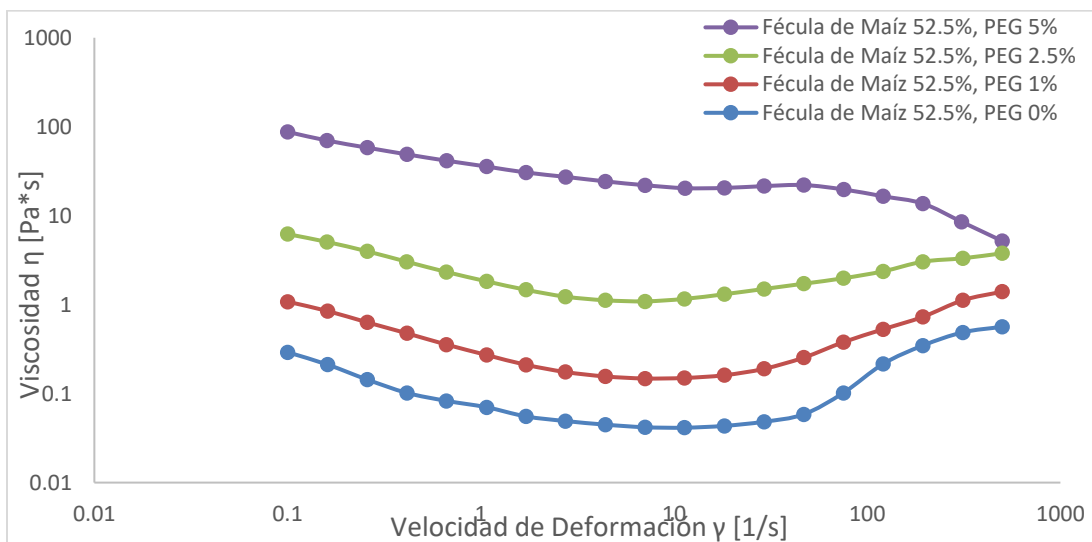


Figura 4.1 Reograma de muestras de concentración de fécula de maíz, PEG y agua a 37°C.

En ambos reogramas, las mezclas muestran un comportamiento no newtoniano, ya que en ninguna de ellas refleja una viscosidad constante a lo largo de la prueba, en las mezclas 1,2 y 3 (véase tabla 2.2).

El comportamiento inicialmente fue pseudo-plástico ya que la viscosidad disminuye cuando se aumenta la velocidad de deformación, seguida de una etapa en la que su viscosidad no varía de forma significativa (casi constante), posteriormente, posee un comportamiento dilatante ya que la viscosidad aumenta, siendo este comportamiento el que se busca para conformar el material a prueba de balas, la principal diferencia entre estas mezclas es que la viscosidad promedio aumenta a la vez que el contenido de PEG, sin embargo, la mezcla 4, debido al agente dispersante con una concentración de 5% p/p, pierde sus propiedades dilatantes y solo describe un comportamiento pseudo-plástico.

Las mezclas a base de dióxido de silicio 5, 6, 7 y 8, poseen un comportamiento similar entre sí, comenzado con una etapa pseudo-plástica, posteriormente las mezclas pasan por un punto de inflexión para después, su viscosidad aumente siendo esta su etapa dilatante, y finalmente las mezclas vuelvan a fluidificar.

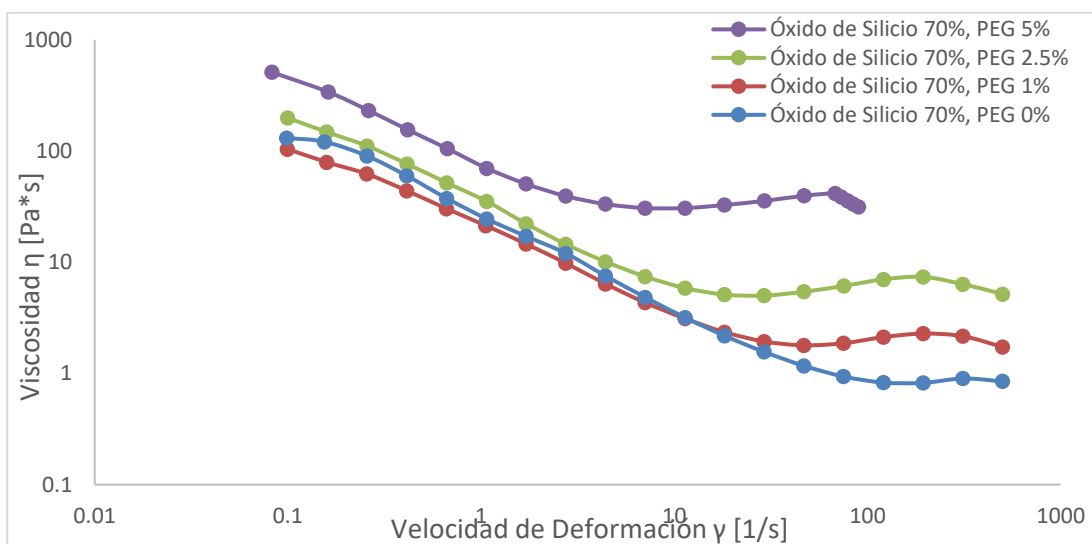


Figura 4.3 Reograma de muestras de concentración de óxido de silicio, PEG y agua a 25°C.

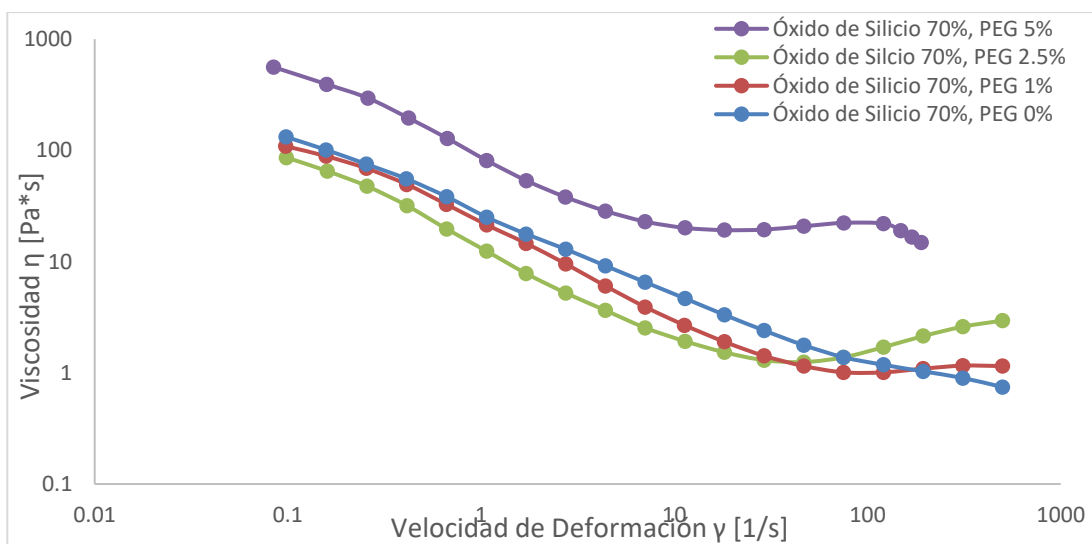


Figura 4.4 Reograma de muestras de concentración de óxido de silicio, PEG y agua a 37°C.

De estas mezclas se seleccionaron dos para el ensayo de impacto, el criterio de selección se basó en las gráficas reológicas anteriormente expuestas, en las cuales se analizó el comportamiento que se ajuste a las características de un sistema de protección balística compuesto de un fluido reforzado con fibras de aramida de alta resistencia, es decir, que el fluido posea una baja viscosidad en el rango de velocidad de deformación de 10^0 - 10^2 [1/s] (equivalente al movimiento promedio del ser humano), y que posteriormente, su viscosidad aumente al somérsele a un impacto, con un rango de velocidad de deformación mayor a los 10^2 [1/s] (equivalente a impactos contundentes o de proyectiles balísticos).

Tabla 4.1.- Mezclas seleccionadas para el ensayo de impacto balístico.

Mezcla	Concentración (%p/p)		
3	Fécula de Maíz 52.5	Agua 45	PEG 2.5
7	Óxido de Silicio 70	Agua 27.5	PEG 2.5

4.2 Datos del ensayo de impacto balístico

Tabla 4.2.- Registro de resultados de panel balístico de control (Solo kevlar®).

Panel balístico	Velocidad de Impacto [m/s]	Velocidad residual [m/s]	Energía de impacto disipada [J]	Penetración de proyectil [mm]
Control	133.33	14.36	30.74	22.3
Control	133.33	14.40	30.75	22.7
Control	137.50	18.33	32.49	23.5
Control	133.33	12.5	30.84	21.9
Control	132.50	16.66	30.24	22.1
Control	136.67	17.14	32.17	23.8

Tabla 4.3.- Registro de resultados de panel balístico con mezcla a base de fécula de maíz.

Panel balístico	Velocidad de Impacto [m/s]	Velocidad residual [m/s]	Energía de impacto disipada [J]	Penetración de proyectil [mm]
Mezcla 3	136.67	11.50	32.45	16.5
Mezcla 3	132.50	11.25	30.50	15.7
Mezcla 3	133.33	9.09	30.96	15.9
Mezcla 3	133.33	11.11	30.89	15.8
Mezcla 3	135.00	11.11	31.68	16.1
Mezcla 3	132.50	11.43	30.49	15.6

Tabla 4.4.- Registro de resultados de panel balístico con mezcla a base de óxido de silicio.

Panel Balístico	Velocidad de Impacto [m/s]	Velocidad residual [m/s]	Energía de impacto disipada [J]	Penetración de proyectil [mm]
Mezcla 7	136.67	16.67	32.20	14.8
Mezcla 7	136.67	15.75	32.25	14.9
Mezcla 7	133.33	15.00	30.72	15.0
Mezcla 7	135.00	15.71	31.46	15.3
Mezcla 7	136.66	18.33	32.10	15.6
Mezcla 7	137.14	16.25	32.45	15.7

Tabla 4.4.- Valores promedio del ensayo de impacto balístico.

Panel Balístico	Velocidad de Impacto [m/s]	Velocidad residual [m/s]	Energía de impacto disipada [J]	Penetración de proyectil [mm]
Control	134.44	15.56	31.21	22.72
Mezcla 3	133.90	10.92	31.16	15.93
Mezcla 7	135.91	16.30	31.86	15.21

Tabla 4.5.- Modelo de registro de resultados de prueba de flexibilidad.

Panel balístico	Masa [g]	Espesor [mm]	Ángulo de flexión [°]
Control	11.6	1.70	50
Mezcla 3	22.2	3.20	48-50
Mezcla 7	24.8	3.85	47-48

Tabla 4.5.- Diferencia porcentual de los paneles balísticos con fluidos no newtonianos con respecto al panel de control.

Panel Balístico	Energía de impacto disipada	Penetración de proyectil	Masa	Espesor	Ángulo de flexión
Mezcla 3	-0.16%	-29.86%	+91.38%	+88.24%	-4.00%
Mezcla 7	+2.08%	-33.05%	+113.79%	+226.47%	-6.00%

Capítulo 5: Conclusiones

5.1 Conclusiones del análisis de reogramas

5.1.1 Mezclas compuesta de fécula de maíz, PEG y agua

De acuerdo a los reogramas generados por el estudio reológico, todas las mezclas con base de fécula de maíz describen un comportamiento no newtoniano, pero solo en las concentraciones de las mezclas 1, 2 y 3, poseen un comportamiento de un fluido dilatante, sin embargo, no hay una variación cuantitativa significativa en cuanto al contenido de polietilenglicol de las mezclas 1,2 y 3, pero, si poseen una diferencia cualitativa, ya que la mezcla 3, tiene un tiempo de sedimentación de las partículas coloidales mayor al de las mezclas 1 y 2.

5.1.1 Mezclas compuesta de óxido de silicio, PEG y agua

De acuerdo a los reogramas generados por el estudio reológico, todas las mezclas con base de óxido de silicio describen un comportamiento no newtoniano, pero solo la mezcla 7 posee un comportamiento dilatante perceptible, sin embargo, no hay una variación cuantitativa significativa en cuanto al contenido de polietilenglicol de las mezclas 5,6 y 8, pero, si poseen una diferencia cualitativa, ya que la mezcla 7, que al igual que la mezcla número 3, tiene un tiempo de sedimentación de las partículas coloidales mayor comparado al resto.

5.2 Conclusiones del ensayo de impacto balístico y de flexibilidad

De acuerdo a los valores expuestos en la tabla 4.4, en promedio, los paneles balísticos compuestos de kevlar® 29 y de fluido compuesto de fécula de maíz y oxido de silicio, si obtuvieron una mejora en la capacidad de detención del proyectil al reducir la penetración en un 29.86 y 33.05 % respectivamente, al compararse con el panel de control únicamente compuesto de tela de kevlar®, sin embargo, como se muestra en la prueba de flexibilidad (tabla 4.5), los panel compuestos de fluido y tela de kevlar®, duplican la masa con respecto al panel de control, por lo que no se recomienda para conformar por completo un chaleco antibalas, pero existe la posibilidad que estos paneles puedan ser usados únicamente para remplazar las placas blindadas en chalecos antibalas con nivel de blindaje III, ya que éstos, pese a que aumentan considerablemente su masa comparada con el panel construido solo por kevlar®, no restringen la movilidad, a diferencia de las placas blindadas de cerámica y/o metal que rondan los 2 hasta 8 kilogramos, dependiendo el nivel de blindaje y número de capas de kevlar® del chaleco antibalas (III o IV). Así mismo, es posible reforzar prendas que cubren brazos, piernas y cuello, para protegerlos de esquilas o proyectiles de baja velocidad.

5.3 Conclusiones generales

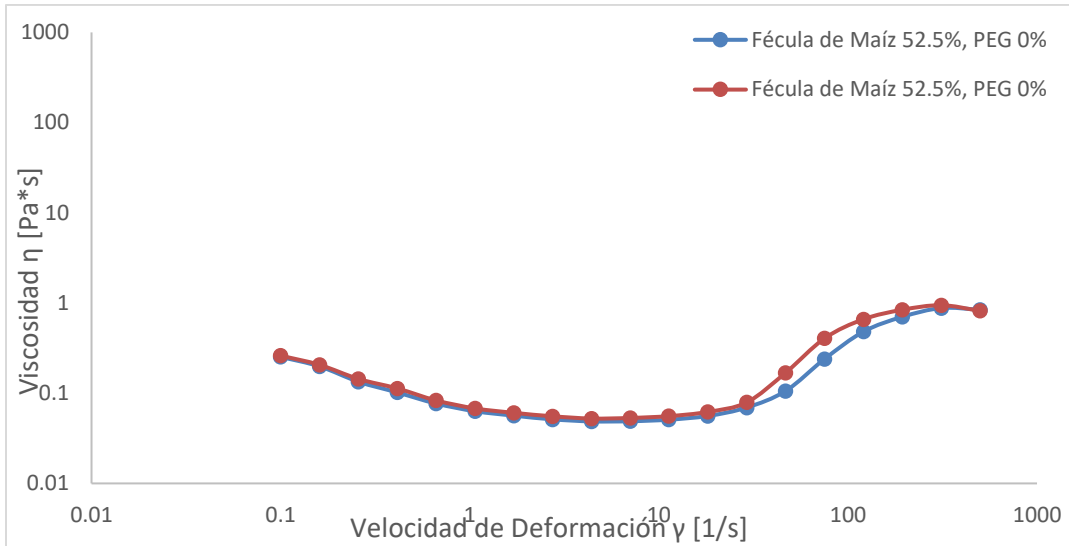
La investigación acerca de la capacidad de un fluido newtoniano para disipar las fuerzas de impacto balístico en conjunto con fibras de alta resistencia mecánica, arrojó resultados mixtos, es decir, si poseen una mayor capacidad de protección al reducir la penetración de un proyectil comparada a un blindaje corporal hecho únicamente de fibras de alta resistencia, sin embargo, si estos fluidos se utilizarán en la totalidad del blindaje corporal, aumentarían al doble la masa del mismo, por lo que no son una opción para sustituir a los sistemas de protección corporal fabricados con fibras de alta resistencia, sin embargo, podrían reforzarlos en áreas específicas como el pecho, brazos, piernas y cuello.

El estudio brinda información importante para continuar con la investigación, utilizando otros materiales que compongan al fluido dilatante, de igual forma, se puede experimentar con nuevas configuraciones para los paneles balísticos.

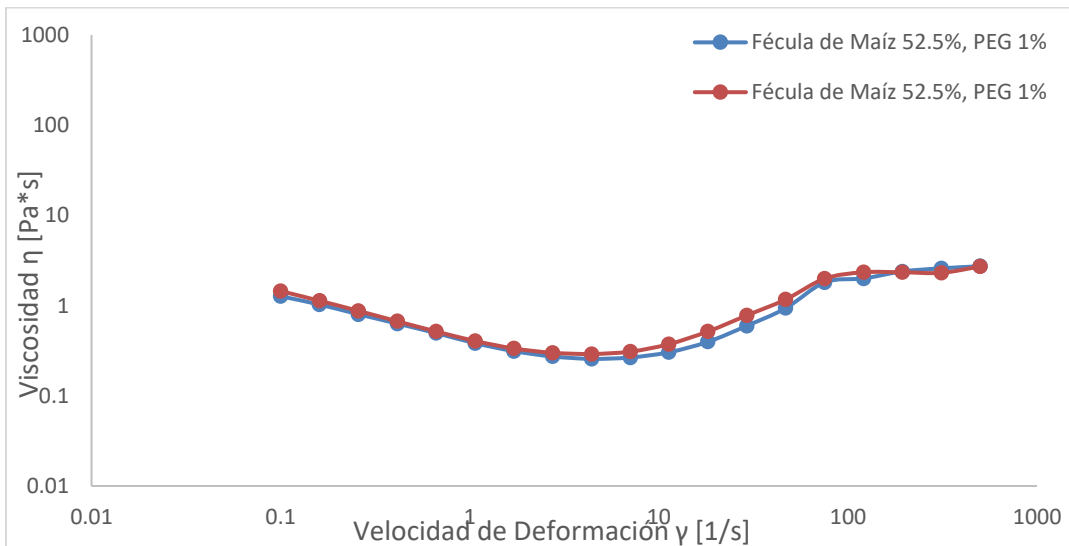
Anexos

Anexo A: Reogramas

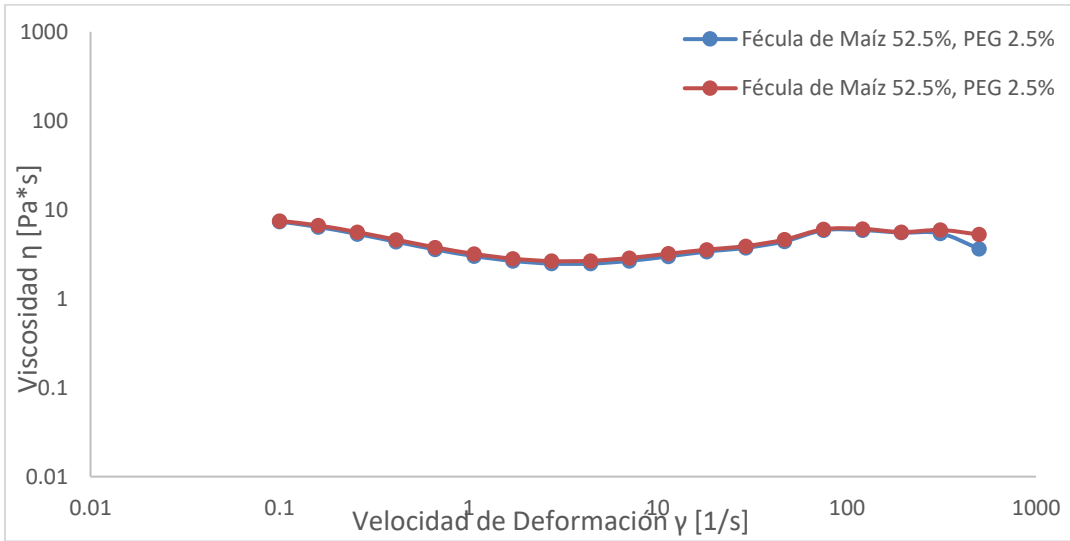
A-I: Reogramas por duplicado de mezclas a base de fécula de maíz a una temperatura de 25°C.



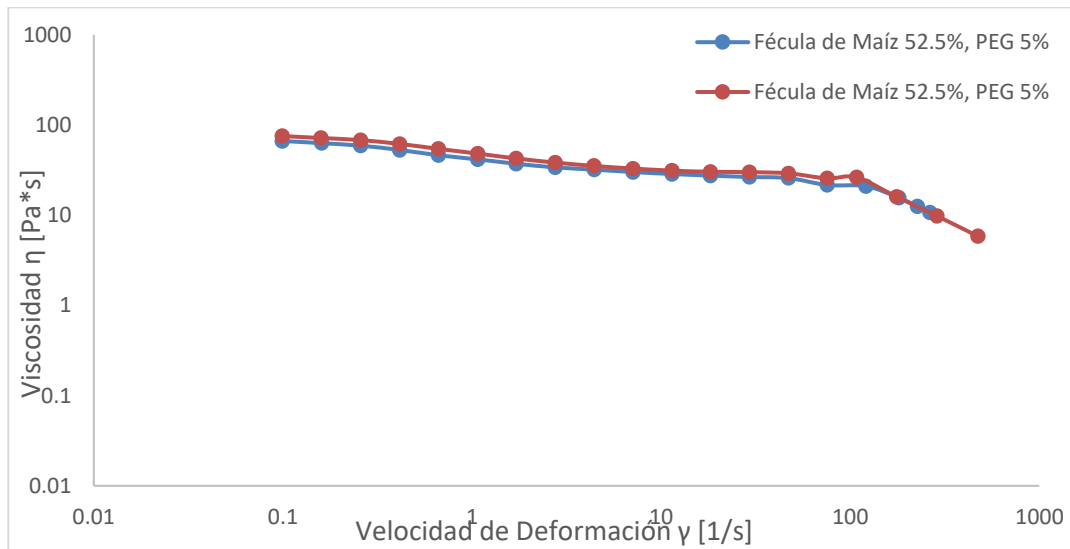
Reograma: Mezcla 1 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 0% y agua 47.5% a 25°C.



Reograma: Mezcla 2 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 1% y agua 46.5% a 25°C.

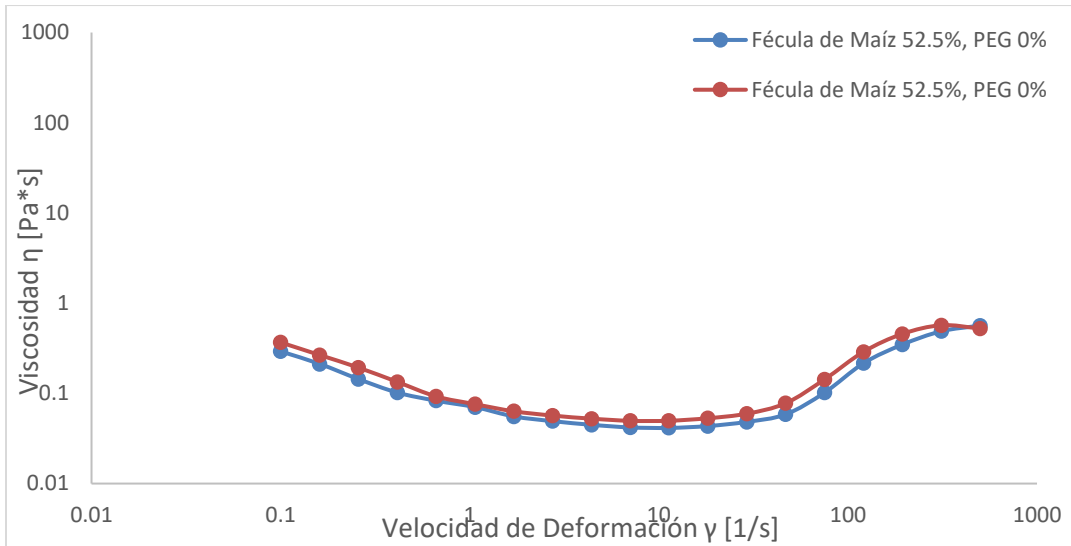


Reograma: Mezcla 3 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 2.5% y agua 45% a 25°C.

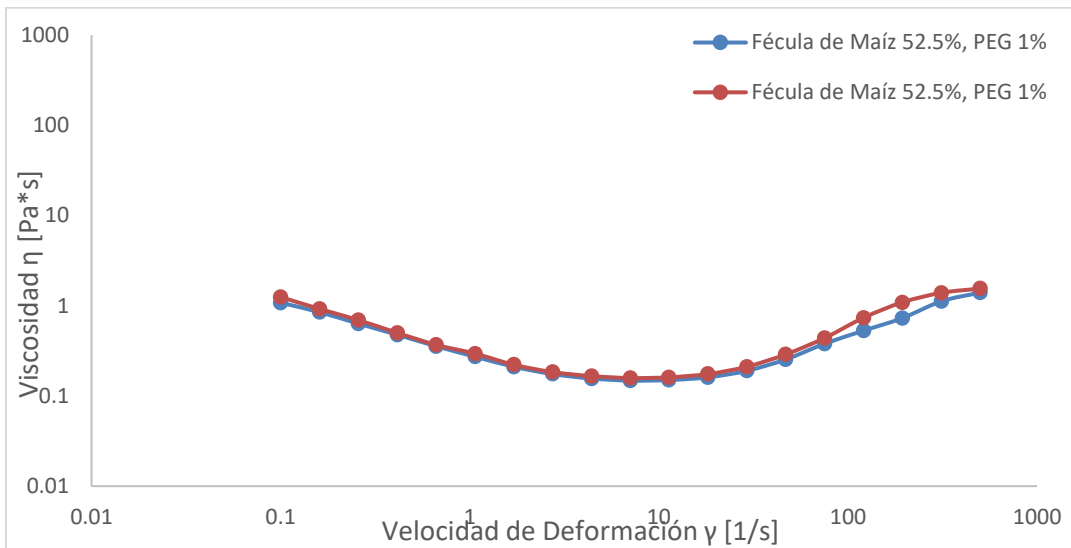


Reograma: Mezcla 4 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 5% y agua 42.5% a 25°C.

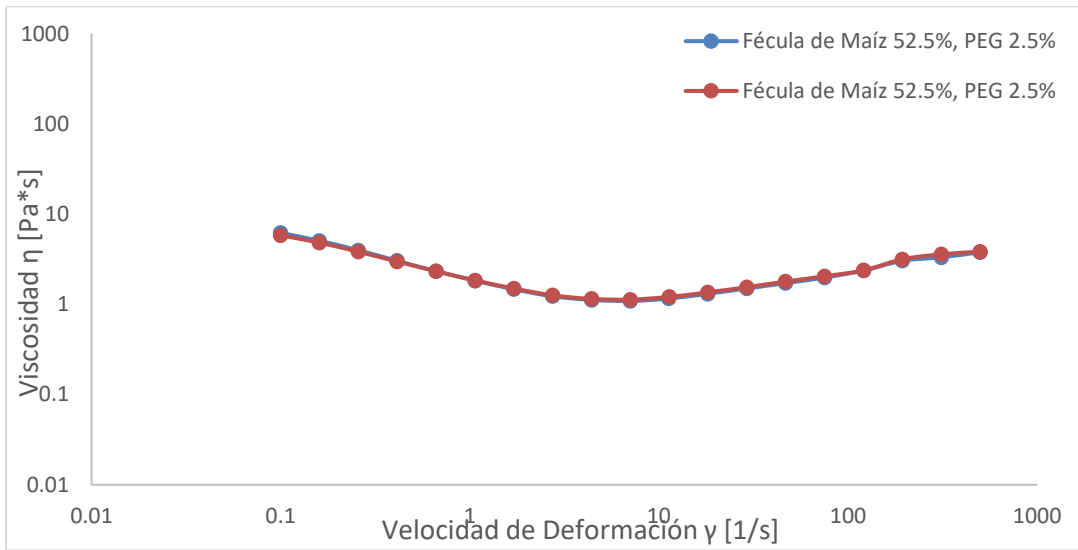
A-II: Reogramas por duplicado de mezclas a base de fécula de maíz a una temperatura de 37°C.



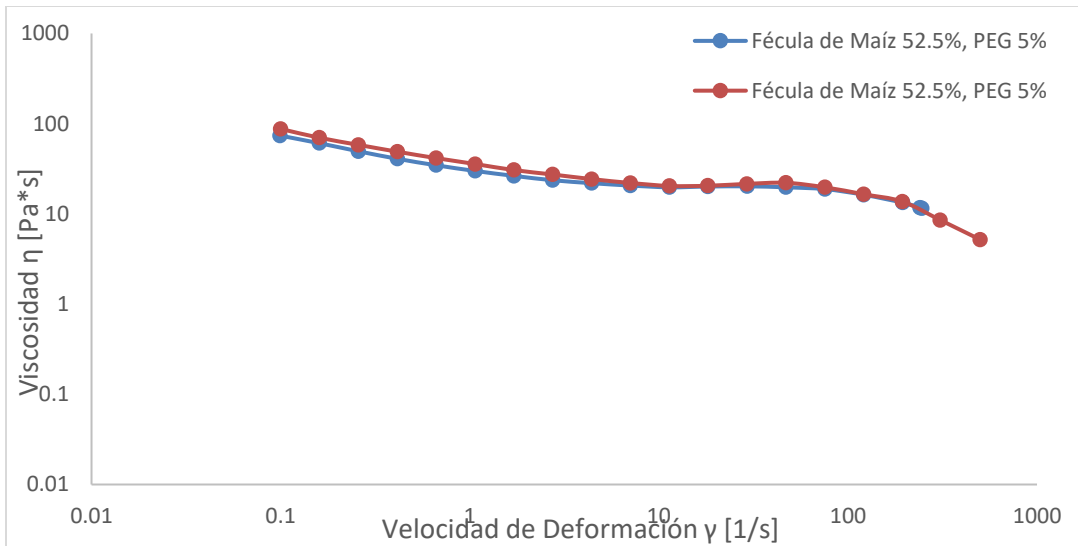
Reograma: Mezcla 1 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 0% y agua 47.5% a 37°C.



Reograma: Mezcla 2 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 1% y agua 46.5% a 37°C

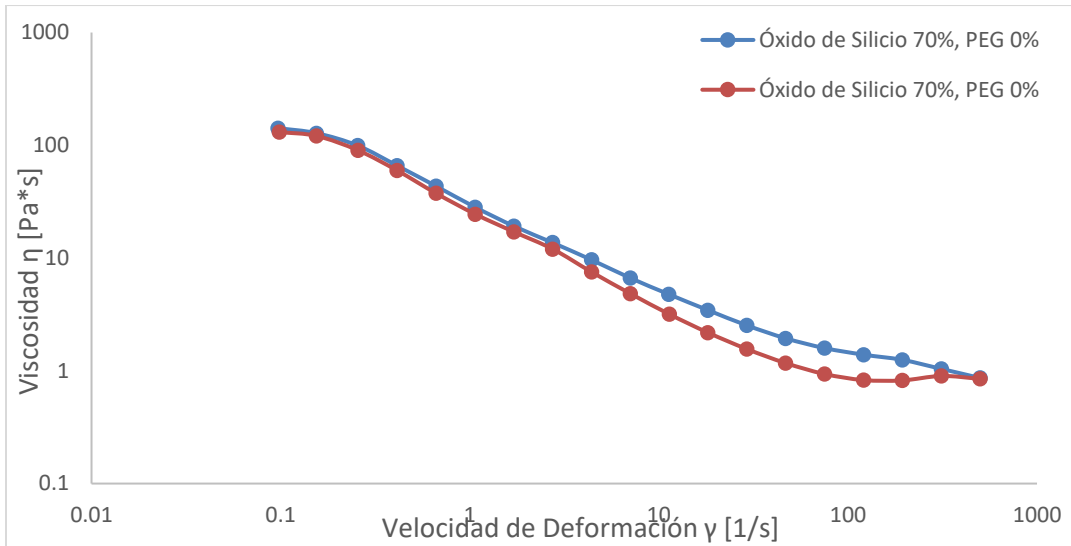


Reograma: Mezcla 3 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 2.5% y agua 45% a 37°C.

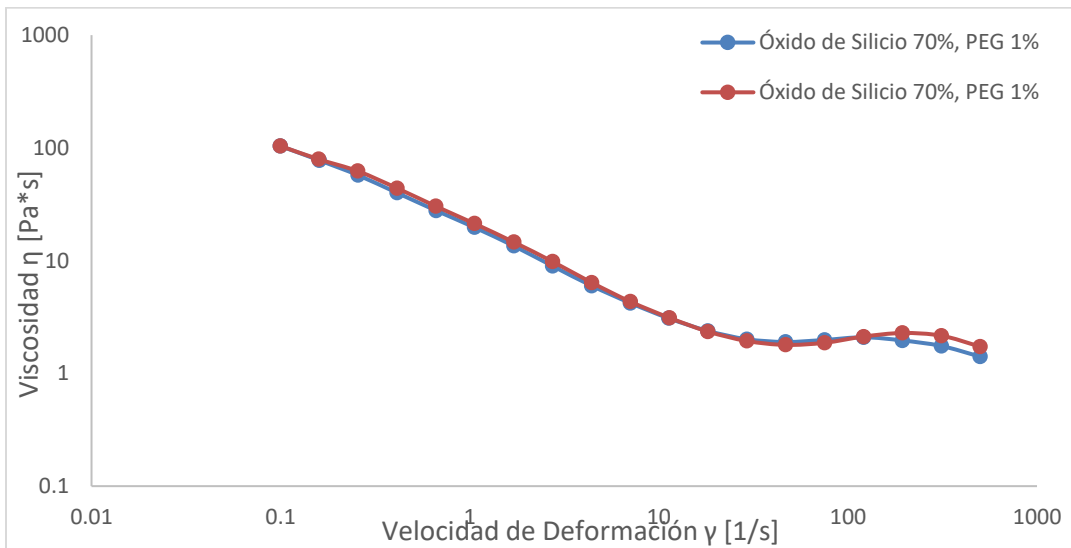


Reograma: Mezcla 4 compuesta de fécula de maíz 52.5%, PEG 5% y agua 42.5% a 37°C.

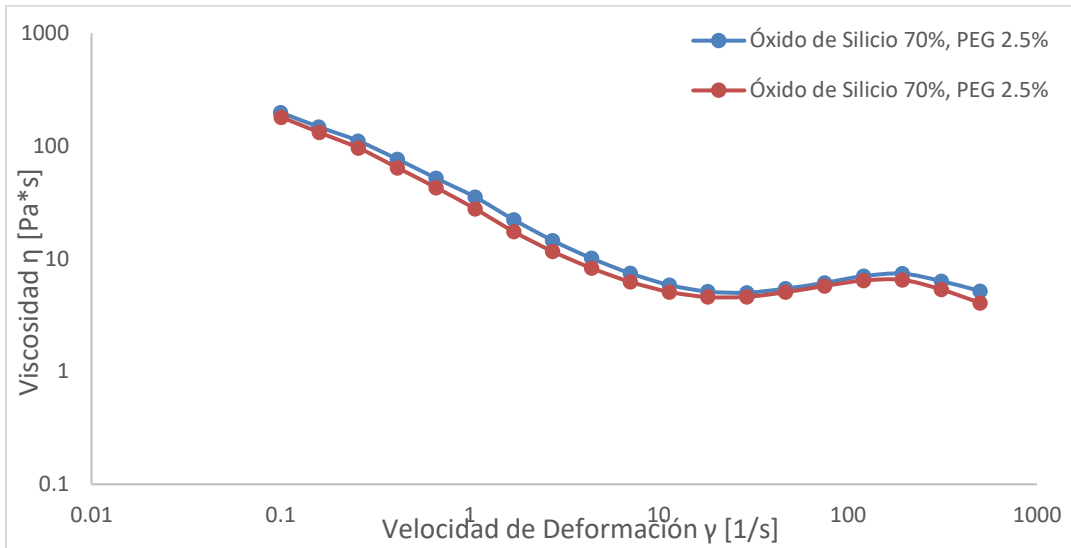
A-III: Reogramas por duplicado de mezclas a base de óxido de silicio a una temperatura de 25°C.



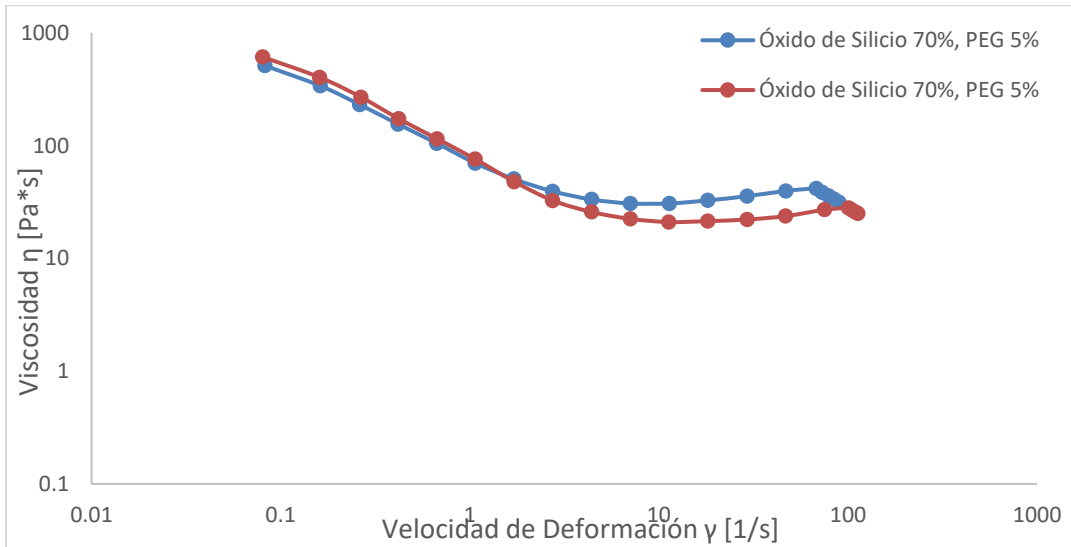
Reograma: Mezcla 5 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 0% y agua 30% a 25°C.



Reograma: Mezcla 6 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 1% y agua 29% a 25°C.

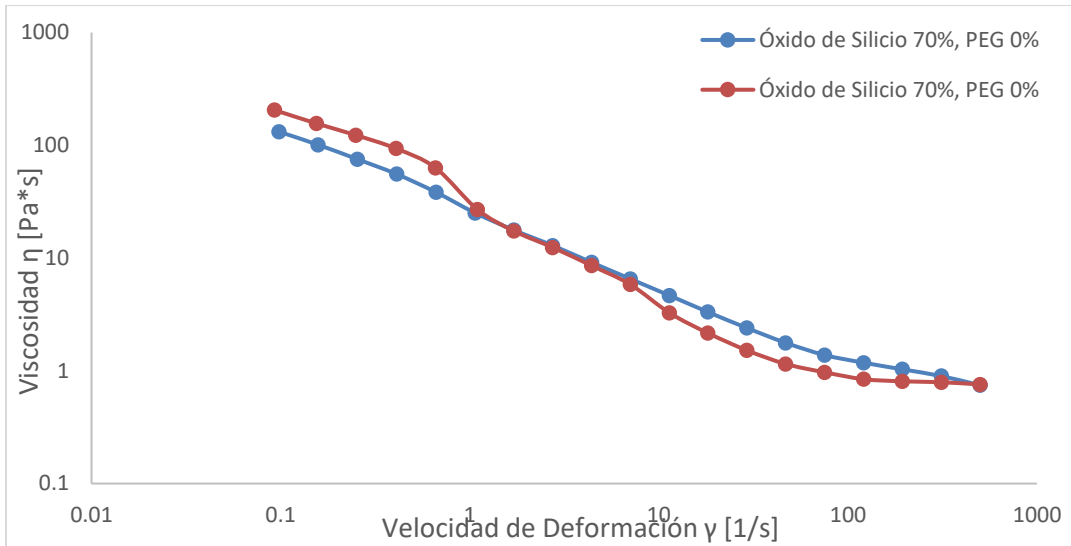


Reograma: Mezcla 7 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 2.5% y agua 27.5% a 25°C.

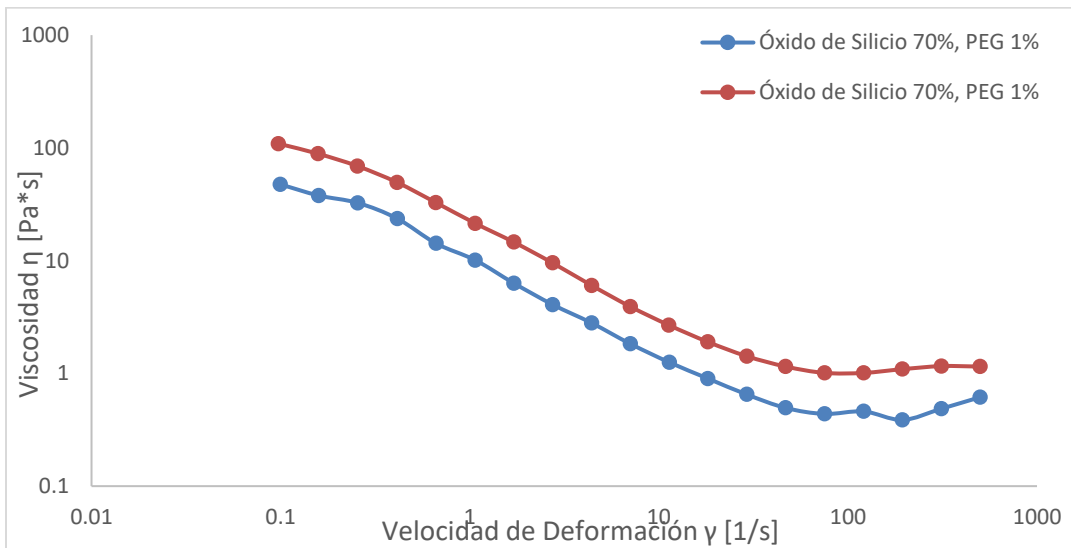


Reograma: Mezcla 8 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 5% y agua 25% a 25°C.

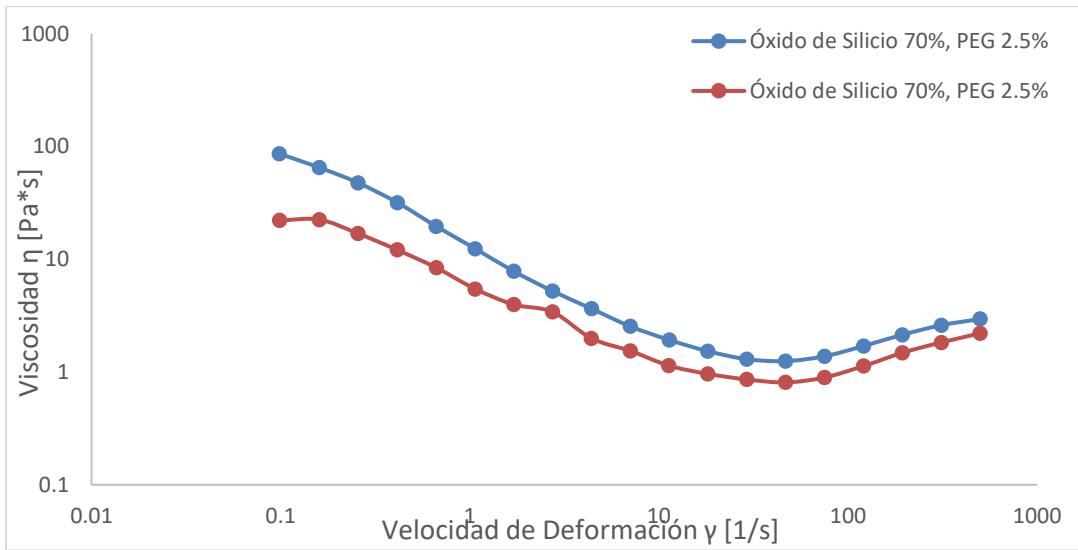
A-IV: Reogramas por duplicado de mezclas a base de óxido de silicio a una temperatura de 37°C.



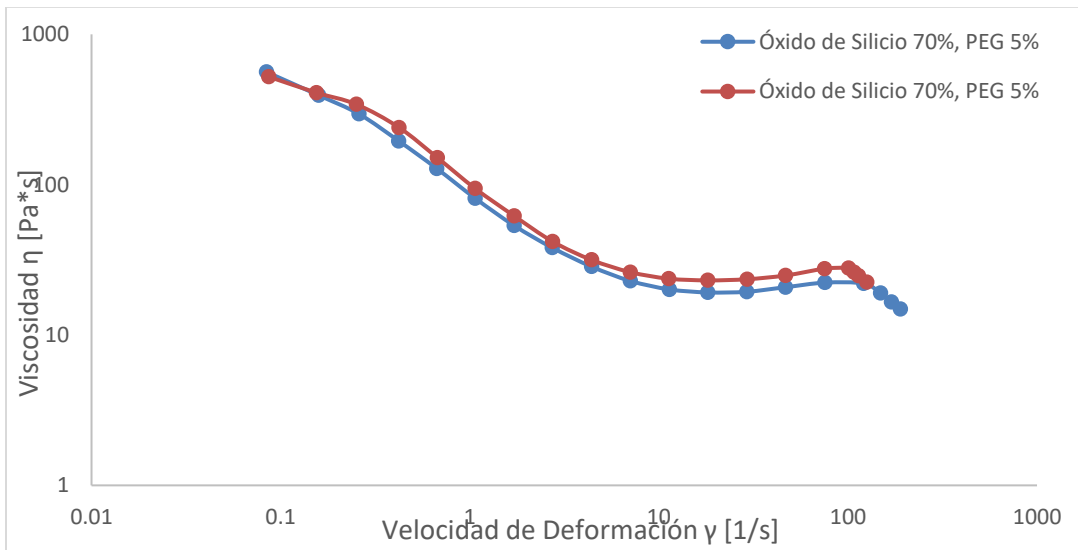
Reograma: Mezcla 5 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 0% y agua 30% a 37°C.



Reograma: Mezcla 6 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 1% y agua 29% a 37°C.



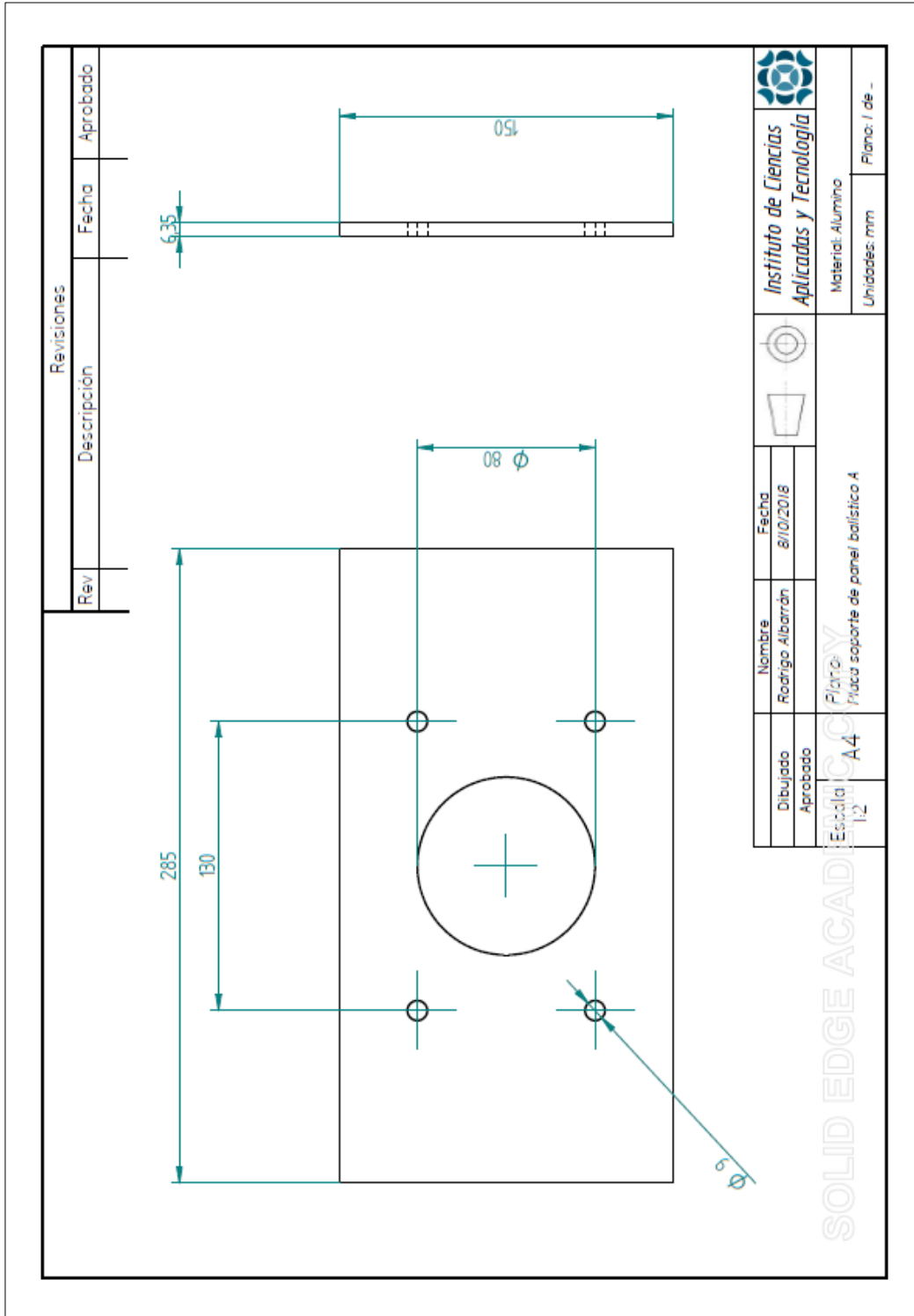
Reograma: Mezcla 7 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 2.5% y agua 27.5% a 37°C.



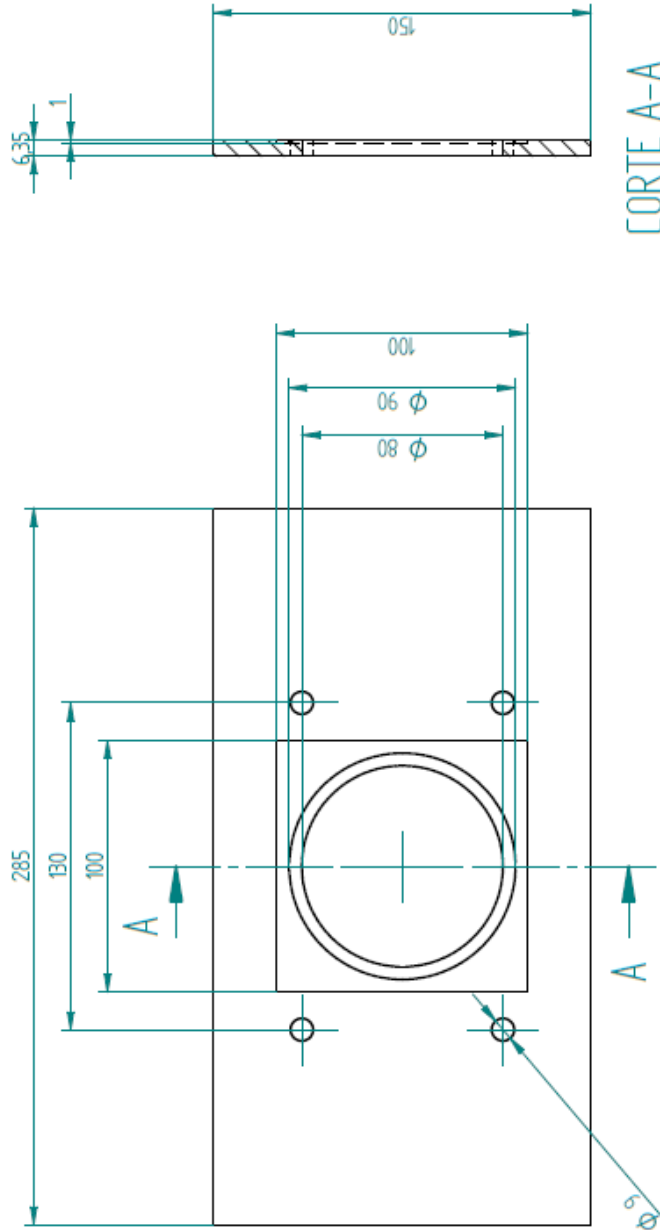
Reograma: Mezcla 8 compuesta de óxido de silicio 70%, PEG 5% y agua 25% a 37°C.

Anexo B: Planos

En este anexo, se presentan todos los planos realizados para la fabricación del banco de pruebas, entorno seguro, etc.



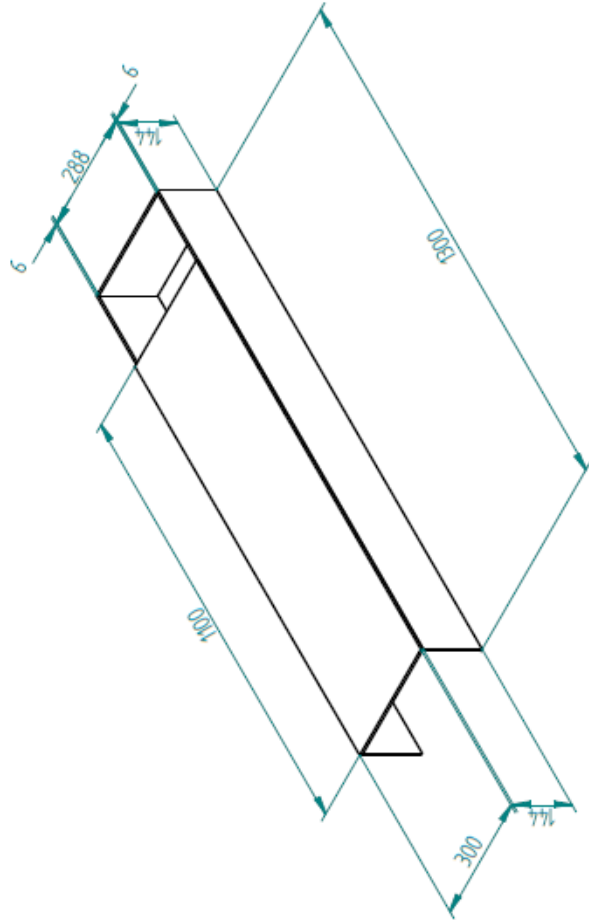
Revisiones		
Rev	Descripción	Aprobado




CORTE A-A

Dibujado	Nombre	Fecha	
Aprobado	Rodrigo Albarrán	8/10/2018	
Escala: 1:2	Placa soporte de panel ballístico B		Material: Aluminio
A4			Unidades: mm
SOLID EDGE ACAD			Plano: 2 de -

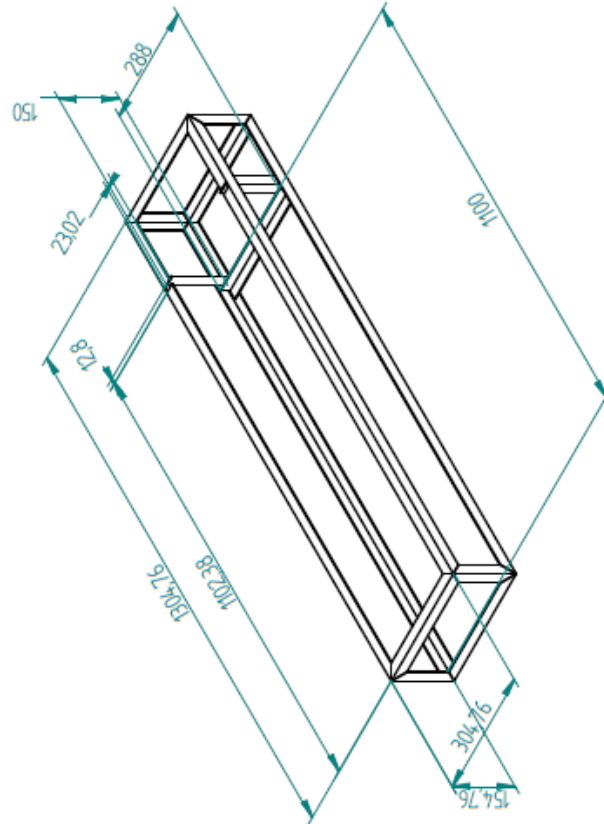
Revisiones		
Rev	Descripción	Aprobado






Dibujado Aprobado	Nombre Rodrigo Albarrán	Fecha 8/10/2018	 Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
Escala 1:10	Proyecto: Estructura de policarbonato		

SOLID EDGE ACAD

Revisiones		
Rev	Descripción	Aprobado



		Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología	
		Material: Latón	
		Unidades: mm	
Dibuja Aprobado		Fecha 8/10/2018	
Escala 1:10		Plano: Estructura de angulo	
Nombre Rodrigo Albarrán		Planos: Estructura de angulo	
A4		Plano: 1 de -	

SOLID EDGE ACAD

Bibliografía

- Bender Jeremy & Gould Skye. (2014). *The 35 Most Powerful Militaries In The World*. Recuperado el 12 de abril de 2018, de Business Insider, Sitio web: <http://www.businessinsider.com/35-most-powerful-militaries-in-the-world-2014-7>
- Çengel Yunus A. & Cimbala John M. (2012). Introduction. En *Fundamentals of thermal-fluid sciences(9)*. New York: McGraw-Hill Higher Education. Primer Ed. p 6.
- Crawford Nathan C. et al. (2012). Shear thickening of corn starch suspensions: Does concentration matter?. *Journal of Colloid and Interface Science*, 396, pp.83-89
- Esquivel Raúl et al. (2000). Propiedades Viscoelásticas de Suspenciones Coloidales. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 3(1), pp.14-22.
- Gamboa Ricardo Alberto et al. (2014). *Diseño y construcción de un cañón de gas de una etapa para pruebas de impacto de alta velocidad*. Recuperado el 18 de junio de 2018, Scientific Electronic Library Online, SciELO, Sitio web: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432015000200003
- Johnson R. W.(1998). *The Handbook of Fluid Dynamics*. Boca Raton Fl. USA, CRC Press LLC p 22.
- Maj. James C. Beyer, MC, William F. Enos, M.D., & Col. Robert H. Holmes. (1962). CHAPTER XI Personnel Protective Armor. En Medical Department, United States Army. *Wound Ballistics for World War II*.(667-669). Washinton D.C.: UNITED STATES ARMY.
- Montero Ignacio. (1994). *El origen de la metalurgia en el sudoeste de la Península Ibérica*. Almería, España: Instituto de Estudios Almerienses. p 19.
- National Institute of Justice (2005). *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06*. Recuperado el 15 de mayo 2018, de U.S. Department of Justice Office of Justice Programs National Institute of Justice, Sitio web: <https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/223054.pdf>
- Norma Oficial Mexicana. (2005). *NOM-166-SCFI-2005, Seguridad al usuario-Chalecos antibalas-Especificaciones y métodos de prueba*. Recuperado el 14 de mayo de 2018, de Diario Oficial de la Federación, Sitio web: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SE/Normas/Oficiales/NOM-166-SCFI-2005.pdf>

- Newton Isaac, Sir (1687) Sección IX *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. (373-400) Londres, Inglaterra: Trinity College Cambridge. pp 373-400
- Wetzel & Wagner (2002). *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids*. Junio 14, 2018, de 23rd Army Science Conference

Recuperado el 7 de mayo de 2018 de United States Army Research Laboratory, Sitio web:

https://www.researchgate.net/profile/Norman_Wagner3/publication/228488787_Advanced_body_armor_utilizing_shear_thickening_fluids/links/542bc73f0cf277d58e8a34b7/Advanced-body-armor-utilizing-shear-thickening-fluids.pdf